

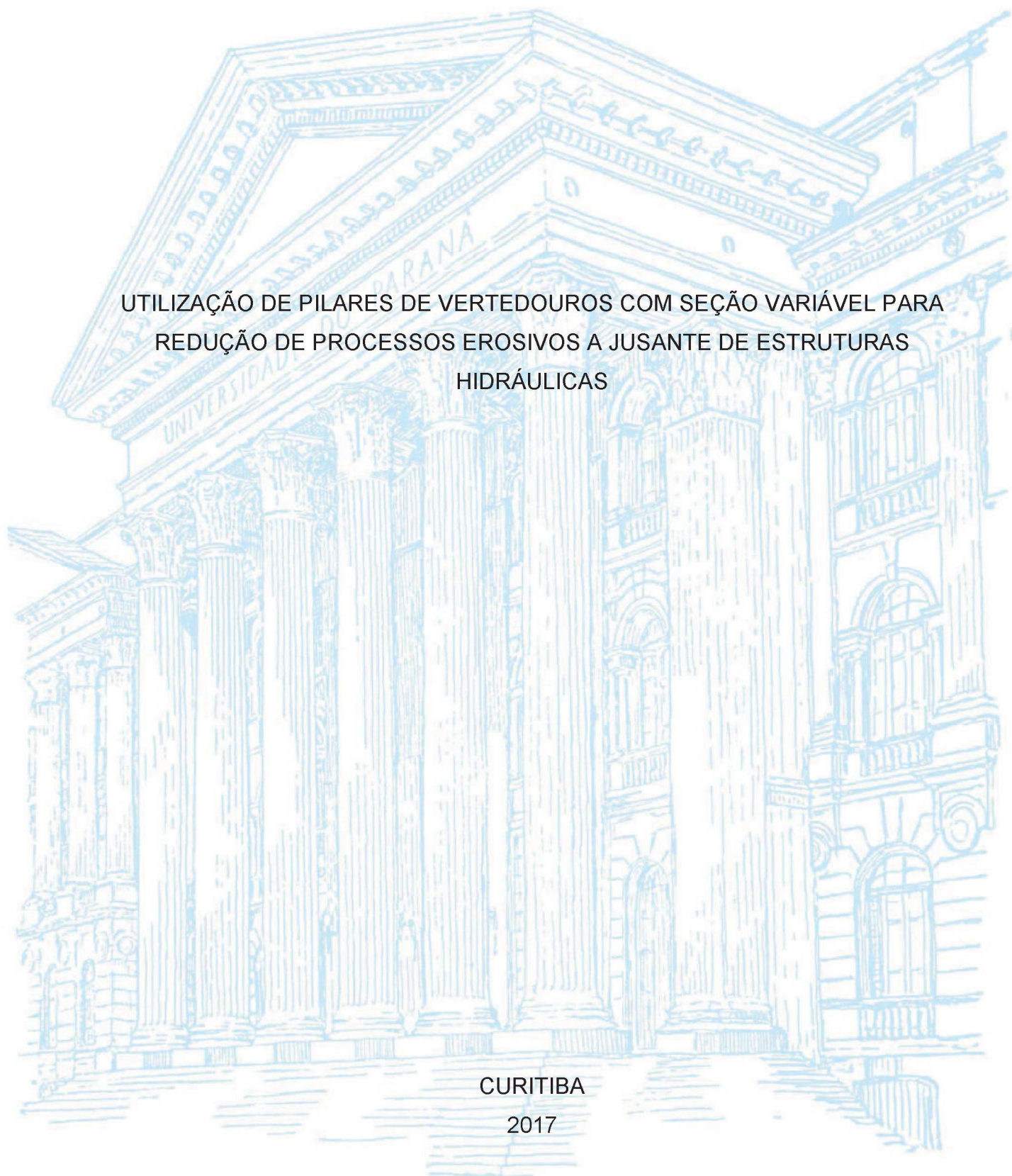
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAROLINA FONTANELLI

UTILIZAÇÃO DE PILARES DE VERTEDOUROS COM SEÇÃO VARIÁVEL PARA  
REDUÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS A JUSANTE DE ESTRUTURAS  
HIDRÁULICAS

CURITIBA

2017



CAROLINA FONTANELLI

UTILIZAÇÃO DE PILARES DE VERTEDOUROS COM SEÇÃO VARIÁVEL PARA  
REDUÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS A JUSANTE DE ESTRUTURAS  
HIDRÁULICAS

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. José Junji Ota

CURITIBA

2017



Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

F697u

Fontanelli, Carolina

Utilização de pilares de vertedouros com seção variável para redução de processos erosivos a jusante de estruturas hidráulicas [recurso eletrônico] / Carolina Fontanelli. – Curitiba, 2017.

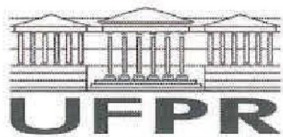
Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2017.

Orientador: José Junji Ota .

1. Dissipação de Energia. 2. Pilares. 3. Modelos hidráulicos. 4. Vertedouros. I. Universidade Federal do Paraná. II. Ota, José Junji. III. Título.

CDD: 536.71

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **CAROLINA FONTANELLI** intitulada: **UTILIZAÇÃO DE PILARES DE VERTEDOUROS COM SEÇÃO VARIÁVEL PARA REDUÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS A JUSANTE DE ESTRUTURAS HIDRÁULICAS**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.


Curitiba, 29 de Junho de 2017.

  
JOSE JUNJI OTA

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

  
MICHAEL MANNICH  
Avaliador Interno (UFPR)

  
INGRID ILLICH MÜLLER  
Avaliador Externo (LACTEC)

  
WILLIAM BONINO RAUEN  
Avaliador Interno (UFPR)

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor José Junji Ota, pela direção e orientação dessa dissertação e o valioso conhecimento transmitido.

Aos meus colegas e amigos Carlos Michaud, Ingrid Illich Muller, Rafael de Lara e Sabrina Cruz, por acompanharem de perto e participarem desse grande aprendizado.

Aos meus gerentes e amigos Giancarlo Castanharo e Roberto Werneck Seara, por me incentivarem a sempre buscar meu crescimento profissional.

Ao Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Pedro Viriato Parigot de Souza (CEHPAR), representado por seus qualificados colaboradores Renata, Carlos, Ronaldo, Idulino, Marcos e Valdinei, e toda a equipe, pela prontidão, orientações e tempo dispendido, e principalmente por tornarem meus dias de ensaios experimentais mais leves e divertidos.

Ao Jaderson, pela grande disposição em me auxiliar nos ensaios.

Ao Fernando Ribas Terabe, por disponibilizar o laboratório, os profissionais e por sempre buscar as melhores alternativas e incentivos para que eu pudesse desenvolver meu trabalho.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR), que foi minha casa durante os 5 anos de graduação, e ao seu qualificado corpo técnico, pela transmissão de valiosos conhecimentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais (PPGERHA), representado por seus professores e colaboradores, pelo imenso aprendizado e amadurecimento adquiridos ao longo dessa pós-graduação.

À COPEL Geração e Transmissão S.A (COPEL GeT), pela oportunidade de realizar essa pós-graduação.

A todos os membros do Departamento de Engenharia Civil da Copel-GeT (DENC), que fazem parte do meu dia-a-dia, e que considero uma segunda família.

Aos meus pais, Cristina e Mauricio, por me darem a vida, o amor e apoio incondicionais, meus valores e referências. Me sinto abençoada e orgulhosa por ser essa partezinha de vocês!!!

Aos meus irmãos Rodrigo e Ana Carla, por me tornarem mais feliz desde o dia em que vieram ao mundo, me acompanhando, me incentivando, me ensinando e por estarem presentes em meus melhores momentos.



Andrey Luis da Silva, por despertar o melhor que há em mim!

À família e amigos, sempre respeitando e valorizando este trabalho, me incentivando nos momentos em que precisei.

A Deus, pela vida. GRATIDÃO!

## RESUMO

A dissipação de energia resultante do escoamento de vertedouros está entre os assuntos que mais requerem atenção no projeto, construção e operação de obras hidráulicas. O planejamento inadequado dos dissipadores pode gerar problemas como fossas de erosão demasiadamente profundas, formação de barra de blocos, que pode causar o aprisionamento de peixes ou interferir na operação de aproveitamentos hidrelétricos, danos nas margens e estruturas próximas do aproveitamento, ou até mesmo danos à própria barragem. Convencionalmente, a dissipação de energia é realizada por meio de alternativas já conhecidas na engenharia, e que dependem de características técnico-econômicas do aproveitamento. Entretanto, soluções relativamente recentes vêm se destacando pela sua aplicação frequente, sobretudo na China, país que construiu diversos aproveitamentos hidrelétricos nas últimas décadas. Dentre essas soluções destacam-se os *flaring piers*, que são alargamentos implantados nos pilares de vertedouros, técnica ainda pouco explorada em outros países. A presente dissertação de mestrado tem por objetivo avaliar o funcionamento dos *flaring piers* através de ensaios realizados em modelo hidráulico reduzido, que consiste em um canal horizontal com fundo móvel erodível. Na saída de uma estrutura de descarga foram acoplados os pilares, a jusante dos quais formou-se o ressalto hidráulico. Foram variados os parâmetros geométricos de nove alternativas de *flaring piers* que foram comparadas com uma alternativa de pilar convencional (sem alargamento). Observou-se o padrão do escoamento dos ensaios, o comprimento aparente do ressalto hidráulico, as características da fossa de erosão formada, além do controle hidráulico que o alargamento dos pilares eventualmente exerce. O presente estudo confirma a alteração no padrão do escoamento efluente de *flaring piers*, e indica ser possível a redução do comprimento de bacias de dissipação de aproveitamentos hidráulicos, quando da utilização de *flaring piers*. Ressalta-se a importância em se aprofundar os estudos sobre essas estruturas, sobretudo no que tange à possível redução na capacidade de descarga de vertedouros.

Palavras-chave: Dissipação de Energia. Erosão a Jusante de Vertedouros. Pilares Alargados. *Flaring Piers*. Modelo Hidráulico Reduzido.

## **ABSTRACT**

The energy dissipation resulting from the discharge of spillways is among the subjects that most require attention in the design, construction and operation of hydraulic structures. Improper design of energy dissipators can generate problems such as erosion trenches that are too deep, block bar formation, which can cause fish trapping or interfere with the operation of hydroelectric power plants, damage to the banks and nearby structures, or even own dam. Conventionally, the energy dissipation is carried out by means of alternatives already known in the engineering, and that depend on technical-economic characteristics of the use. However, relatively recent solutions have been notable for their frequent application, especially in China, which has built several hydropower plants in recent decades. Among these solutions are the flaring piers, which are enlargements implanted in the piers of spillways, a technique still not well explored in other countries. This dissertation aims to evaluate the functioning of the flaring piers through tests carried out in a reduced hydraulic model, which consists of a horizontal channel with mobile erodible bottom. At the outlet of a discharge structure were attached the piers, downstream of which formed the hydraulic jump. The geometric parameters of nine flaring piers alternatives were varied that were compared with a conventional alternative (without enlargement). The flow pattern of the tests, the apparent length of the hydraulic jump, the characteristics of the formed erosion pit, and the hydraulic control that the piers eventually performed were observed. The present study confirms the change in the flow pattern of effluent flaring piers, and indicates that it is possible to reduce the length of stilling basin for hydraulic structures when using flaring piers. It is important to emphasize the studies on these structures, especially with regard to the possible reduction in the discharge capacity of spillways.

Keywords: Energy Dissipation. Scour Downstream of Spillways. Flaring Piers 3. Hydraulic Model.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PARÂMETROS DO RESSALTO HIDRÁULICO .....	21
FIGURA 2 – BACIA DE DISSIPAÇÃO COM ADENDOS – BLOCOS E SOLEIRAS .....	23
FIGURA 3 – ESCOAMENTO NO VERTEDOURO DE DACHAOSHAN.....	27
FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO EM PLANTA DOS FLARING PIERS.....	28
FIGURA 5 – INÍCIO DO ALARGAMENTO DOS FLARING PIERS .....	29
FIGURA 6 – PERSPECTIVA DE UM PILAR DE SEÇÃO RETANGULAR .....	31
FIGURA 7 – PILAR RETANGULAR NA USINA DE BAISE.....	32
FIGURA 8 – PERSPECTIVA DE UM PILAR DE SEÇÃO Y .....	32
FIGURA 9 – VERTEDOUROS COM PILARES COM SEÇÃO Y.....	33
FIGURA 10 – PERSPECTIVA DE UM PILAR DE SEÇÃO X .....	34
FIGURA 11 – VERTEDOUROS COM PILARES COM SEÇÃO X.....	35
FIGURA 12 – ESCOAMENTO EM BACIA DE DISSIPAÇÃO.....	36
FIGURA 13 – VERTIMENTO NA BARRAGEM DE ANKANG .....	37
FIGURA 14 – USINA HIDRELÉTRICA DE YANTAN .....	37
FIGURA 15 – USINA HIDRELÉTRICA DE WUQIANGXI .....	38
FIGURA 16 – PERFIL DO VERTEDOURO DE PANJIAKOU.....	39
FIGURA 17 – EROSÃO A JUSANTE DO VERTEDOURO DE PANJIAKOU .....	39
FIGURA 18 – VERTEDOURO DA USINA DE GEHEYAN .....	40
FIGURA 19 – VERTIMENTO SOBRE DEGRAUS – UHE DACHAOSHAN .....	41
FIGURA 20 – ESQUEMA DO ESCOAMENTO - UHE DACHAOSHAN .....	42
FIGURA 21 – PARÂMETROS UTILIZADOS POR NI (1998).....	43
FIGURA 22 – PARÂMETROS UTILIZADOS POR LI ET AL. (2000).....	44
FIGURA 23 – INFLUÊNCIA DA RAZÃO DE CONTRAÇÃO.....	46
FIGURA 24 – INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE DEFLEXÃO .....	46
FIGURA 25 – PROFUNDIDADES DE EROSÃO OBTIDAS POR LI ET AL. (2000) ..	48
FIGURA 26 – ZONA CUNEIFORME A MONTANTE DO END-SILL .....	52
FIGURA 27 – PARÂMETROS UTILIZADOS POR YIN, LIANG E GONG (2010).....	54
FIGURA 28 – CARACTERÍSTICAS DO JATO EFLUENTE DE FLARING PIERS ....	56
FIGURA 29 – ASPECTO LONGITUDINAL DO JATO DE FLARING PIERS.....	57
FIGURA 30 – VERTIMENTO E SIMULAÇÕES NA USINA DE SUOFENGYING .....	58
FIGURA 31 – PADRÃO DE ESCOAMENTO DE FLARING PIERS EM X .....	59
FIGURA 32 – PADRÃO DE ESCOAMENTO ATRAVÉS DE FLARING PIERS.....	60

FIGURA 33 – PADRÃO DE ESCOAMENTO ATRAVÉS DE FLARING PIERS.....	60
FIGURA 34 – ESQUEMA DE PILAR ASSIMÉTRICO .....	63
FIGURA 35 – VELOCIDADES JUNTO AO FUNDO DO CANAL .....	64
FIGURA 36 –VELOCIDADES APÓS O TÉRMINO DO RESSALTO HIDRÁULICO ..	65
FIGURA 37 –VELOCIDADE APÓS O TÉRMINO DO RESSALTO HIDRÁULICO ....	65
FIGURA 38 – PILARES ACOPLADOS NA SAÍDA DO ÓRGÃO DE DESCARGA ....	67
FIGURA 39 – VISTA LATERAL DA CAIXA DE EROSÃO.....	68
FIGURA 40 – PONTEIRA LIMNIMÉTRICA MÓVEL .....	69
FIGURA 41 – SISTEMA DE REFERÊNCIA DA FOSSA DE EROSÃO.....	71
FIGURA 42 – MALHA NO PLANO XY DA FOSSA DE EROSÃO .....	72
FIGURA 43 – INDICAÇÃO DA BARRA FORMADA.....	72
FIGURA 44 – PADRÃO DO ESCOAMENTO - ALT A.....	77
FIGURA 45 – EXTRAVAZAMENTO DE MATERIAL (ALT A).....	77
FIGURA 46 – AFOGAMENTO DO BOCAL – ALTERNATIVA A .....	78
FIGURA 47 – PADRÃO DO ESCOAMENTO - FLARING PIERS (ALT G).....	78
FIGURA 48 – PADRÃO DO ESCOAMENTO - FLARING PIERS (ALT C) .....	79
FIGURA 49 – PERFIL DO RABO DE GALO (ALT B).....	80
FIGURA 50 – VISTA FRONTAL DO RABO DE GALO (ALT B) .....	80
FIGURA 51 – PERFIL DO RABO DE GALO (ALT F).....	81
FIGURA 52 – VÓRTICES A JUSANTE DOS PILARES (ALT C).....	81
FIGURA 53 – CRITÉRIO - COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO .....	82
FIGURA 54 – CRITÉRIO - PROFUNDIDADE DE EROSÃO E ALTURA DE BARRA .....	84
FIGURA 55 – COMPRIMENTOS DO RESSALTO HIDRÁULICO EM RELAÇÃO À ALT A.....	91
FIGURA 56 – COMPARAÇÃO DOS COMPRIMENTOS DO RESSALTO HIDRÁULICO EM RELAÇÃO À ALT A CONSIDERANDO AS EQ 36 E 37 .....	91
FIGURA 57 – PROFUNDIDADES MÁXIMAS DE EROSÃO .....	94
FIGURA 58 – PROFUNDIDADE AO LONGO DO EIXO LONGITUDINAL CENTRAL .....	94
FIGURA 59 – ALTURAS MÁXIMAS DE BARRA – ETAPA I.....	96
FIGURA 60 – ALTURAS DA BARRA NO EIXO LONGITUDINAL CENTRAL – ETAPA I.....	96

FIGURA 61 – VOLUMES TOTAIS ERODIDOS EM RELAÇÃO À ALTERNATIVA A97	
FIGURA 62 – AFOGAMENTO DO BOCAL DAS ALTERNATIVAS B, D E G.....	99
FIGURA 63 – PLANTA DO CANAL EXPERIMENTAL .....	107
FIGURA 64 – PERFIL DO CANAL EXPERIMENTAL .....	108
FIGURA 65 – PLANTA DA ALT. A ( $\eta = 1,00$ ; $\theta = 0^\circ$ ) .....	109
FIGURA 66 – PLANTA DA ALT. B ( $\eta = 0,40$ ; $\theta = 15^\circ$ ) .....	109
FIGURA 67 – PLANTA DA ALT. C ( $\eta = 0,40$ ; $\theta = 20^\circ$ ) .....	110
FIGURA 68 – PLANTA DA ALT. D ( $\eta = 0,40$ ; $\theta = 25^\circ$ ) .....	110
FIGURA 69 – PLANTA DA ALT. E ( $\eta = 0,50$ ; $\theta = 15^\circ$ ) .....	111
FIGURA 70 – PLANTA DA ALT. F ( $\eta = 0,50$ ; $\theta = 20^\circ$ ) .....	111
FIGURA 71 – PLANTA DA ALT. G ( $\eta = 0,50$ ; $\theta = 25^\circ$ ).....	112
FIGURA 72 – PLANTA DA ALT. H ( $\eta = 0,66$ ; $\theta = 15^\circ$ ).....	112
FIGURA 73 – PLANTA DA ALT. I ( $\eta = 0,66$ ; $\theta = 20^\circ$ ).....	113
FIGURA 74 – PLANTA DA ALT. J ( $\eta = 0,66$ ; $\theta = 25^\circ$ ).....	113
FIGURA 75 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. A ( $\eta = 1,00$ ; $\theta = 0^\circ$ ) .....	114
FIGURA 76 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. B ( $\eta = 0,40$ ; $\theta = 15^\circ$ ) .....	114
FIGURA 77 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. C ( $\eta = 0,40$ ; $\theta = 20^\circ$ ).....	114
FIGURA 78 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. D ( $\eta = 0,40$ ; $\theta = 25^\circ$ ).....	115
FIGURA 79 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. E ( $\eta = 0,50$ ; $\theta = 15^\circ$ ) .....	115
FIGURA 80 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. F ( $\eta = 0,50$ ; $\theta = 20^\circ$ ) .....	115
FIGURA 81 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. G ( $\eta = 0,50$ ; $\theta = 25^\circ$ ).....	116
FIGURA 82 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. H ( $\eta = 0,66$ ; $\theta = 15^\circ$ ).....	116
FIGURA 83 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. I ( $\eta = 0,66$ ; $\theta = 20^\circ$ ).....	116
FIGURA 84 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. J ( $\eta = 0,66$ ; $\theta = 25^\circ$ ).....	117
FIGURA 85 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. A ( $\eta = 1,00$ ; $\theta = 0^\circ$ ) .....	118
FIGURA 86 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. A ( $\eta = 1,00$ ; $\theta = 0^\circ$ ).....	118
FIGURA 87 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. B ( $\eta = 0,40$ ; $\theta = 15^\circ$ ) .....	118
FIGURA 88 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. B ( $\eta = 0,40$ ; $\theta = 15^\circ$ ).....	118
FIGURA 89 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. C ( $\eta = 0,40$ ; $\theta = 20^\circ$ ).....	119
FIGURA 90 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. C ( $\eta = 0,40$ ; $\theta = 20^\circ$ ).....	119
FIGURA 91 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. D ( $\eta = 0,40$ ; $\theta = 25^\circ$ ).....	119
FIGURA 92 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. D ( $\eta = 0,40$ ; $\theta = 25^\circ$ ).....	119



FIGURA 93 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. E ( $\eta = 0,50$ ; $\theta = 15^\circ$ ) .....	120
FIGURA 94 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. E ( $\eta = 0,50$ ; $\theta = 15^\circ$ ).....	120
FIGURA 95 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. F ( $\eta = 0,50$ ; $\theta = 20^\circ$ ) .....	120
FIGURA 96 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. F ( $\eta = 0,50$ ; $\theta = 20^\circ$ ).....	120
FIGURA 97 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. G ( $\eta = 0,50$ ; $\theta = 25^\circ$ ).....	121
FIGURA 98 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. G ( $\eta = 0,50$ ; $\theta = 25^\circ$ ) .....	121
FIGURA 99 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. H ( $\eta = 0,66$ ; $\theta = 15^\circ$ ).....	121
FIGURA 100 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. H ( $\eta = 0,66$ ; $\theta = 15^\circ$ ).....	121
FIGURA 101 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. I ( $\eta = 0,66$ ; $\theta = 20^\circ$ ).....	122
FIGURA 102 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. I ( $\eta = 0,66$ ; $\theta = 20^\circ$ ) .....	122
FIGURA 103 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. J ( $\eta = 0,66$ ; $\theta = 25^\circ$ ).....	122
FIGURA 104 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. J ( $\eta = 0,66$ ; $\theta = 25^\circ$ ) .....	122
FIGURA 105 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. A – ETAPA 1 .....	144
FIGURA 106 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. A – ETAPA 2 .....	144
FIGURA 107 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. B – ETAPA 1 .....	145
FIGURA 108 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. B – ETAPA 2 .....	145
FIGURA 109 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. C – ETAPA 1 .....	146
FIGURA 110 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. C – ETAPA 2 .....	146
FIGURA 111 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. D – ETAPA 1 .....	147
FIGURA 112 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. D – ETAPA 2 .....	147
FIGURA 113 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. E – ETAPA 1 .....	148
FIGURA 114 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. E – ETAPA 2 .....	148
FIGURA 115 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. F – ETAPA 1.....	149
FIGURA 116 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. F – ETAPA 2.....	149
FIGURA 117 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. G – ETAPA 1 .....	150
FIGURA 118 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. G – ETAPA 2.....	150
FIGURA 119 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. H – ETAPA 1 .....	151
FIGURA 120 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. H – ETAPA 2.....	151
FIGURA 121 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. I – ETAPA 1.....	152
FIGURA 122 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. I – ETAPA 2.....	152
FIGURA 123 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. J – ETAPA 1 .....	153
FIGURA 124 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. J – ETAPA 2.....	153
FIGURA 125 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. A – ETAPA 1 .....	155

FIGURA 126 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. A – ETAPA 2 .....	156
FIGURA 127 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. B – ETAPA 1 .....	157
FIGURA 128 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. B – ETAPA 2 .....	158
FIGURA 129 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. C – ETAPA 1 .....	159
FIGURA 130 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. C – ETAPA 2 .....	160
FIGURA 131 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. D – ETAPA 1 .....	161
FIGURA 132 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. D – ETAPA 2 .....	162
FIGURA 133 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. E – ETAPA 1 .....	163
FIGURA 134 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. E – ETAPA 2 .....	164
FIGURA 135 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. F – ETAPA 1.....	165
FIGURA 136 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. F – ETAPA 2.....	166
FIGURA 137 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. G – ETAPA 1.....	167
FIGURA 138 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. G – ETAPA 2.....	168
FIGURA 139 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. H – ETAPA 1 .....	169
FIGURA 140 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. H – ETAPA 2 .....	170
FIGURA 141 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. I – ETAPA 1.....	171
FIGURA 142 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. I – ETAPA 2.....	172
FIGURA 143 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. J – ETAPA 1 .....	173
FIGURA 144 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. J – ETAPA 2 .....	174

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS .....	17
1.1.1 Objetivo geral .....	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA .....	18
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>20</b>
2.1 ASPECTOS GERAIS DA DISSIPAÇÃO DE ENERGIA .....	20
2.2 DISSIPAÇÃO DE ENERGIA POR RESSALTO HIDRÁULICO.....	21
2.2.1.1 Classificação do ressalto hidráulico quanto ao número de Froude .....	24
2.2.1.2 Profundidades conjugadas do ressalto hidráulico .....	24
2.2.1.3 Comprimento do ressalto hidráulico .....	25
2.3 FLARING PIERS .....	27
2.3.1 Parâmetros Geométricos dos <i>Flaring Piers</i> .....	28
2.3.2 Tipos de Geometria de Flaring Piers.....	31
2.3.2.1 Pilares de Seção Retangular .....	31
2.3.2.2 Flaring Piers de Seção em Y .....	32
2.3.2.3 Flaring Piers de Seção em X.....	34
2.3.2.4 Flaring Piers de Seção em T e em V .....	35
2.3.3 Flaring Piers associados a dissipadores de energia convencionais.....	35
2.3.3.1 Flaring Piers associados a bacia de dissipação .....	36
2.3.3.2 Flaring Piers associados a bacia defletora .....	39
2.3.3.3 Flaring Piers associados a salto de esqui.....	40
2.3.3.4 Flaring Piers associados a vertedouro em degraus.....	41
2.3.4 Estudos Desenvolvidos sobre os Flaring Piers .....	42
2.3.4.1 Relação entre a razão de contração e a profundidade conjugada lenta.....	42
2.3.4.2 Influência dos flaring piers na bacia de dissipação.....	44
2.3.4.3 Aplicação dos <i>flaring piers</i> em aproveitamentos com baixo número de Froude	49
2.3.4.4 Influência dos <i>flaring piers</i> associados a vertedouros de barragens em arco na capacidade de descarga .....	49
2.3.4.5 Estabilidade da laje de bacias de dissipação .....	51
2.3.4.6 Posição de início do alargamento dos pilares em relação à ogiva .....	51



2.3.4.7 Comprimento do ressalto hidráulico .....	52
2.3.4.8 Comprimento adimensional do ressalto hidráulico .....	54
2.3.4.9 Processo erosivo formado por um vertedouro tipo salto de esqui .....	55
2.3.4.10 Comparação entre as geometrias do tipo Y e X.....	57
2.3.4.11 Profundidade conjugada de jusante e <i>flaring piers</i> do tipo X.....	58
2.3.4.12 <i>Flaring piers</i> do tipo X associados a bacias defletoras.....	58
2.3.4.13 <i>Flaring piers</i> associados a barragens em arco.....	59
2.3.4.14 Estudos relacionados à cavitação de vertedouros em degraus .....	62
2.3.4.15 Pressões sobre bacias de dissipação .....	63
2.3.4.16 Velocidades a jusante dos <i>flaring piers</i> .....	64
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>66</b>
3.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS.....	66
3.2 MÉTODO.....	69
3.2.1 Condições de Contorno.....	70
3.2.2 Fossa de Erosão .....	71
3.2.3 Duração dos ensaios.....	73
3.2.4 Procedimentos de ensaios .....	73
3.2.5 Restrições em Modelos Reduzidos .....	74
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>75</b>
4.1 CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO .....	75
4.1.1 Padrão do escoamento da Alternativa A ( $\eta=1,00$ ; $\theta=0^\circ$ ) .....	76
4.1.2 Padrão do escoamento das alternativas dotadas de <i>flaring piers</i> .....	78
4.1.2.1 Formação de rabo-de-galo .....	79
4.1.2.2 Formação de vórtices a jusante dos pilares .....	81
4.2 COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO.....	81
4.3 CARACTERIZAÇÃO DA FOSSA DE EROSÃO .....	83
4.3.1 Profundidade de erosão e altura de barra.....	84
4.3.2 Volume total erodido.....	87
4.4 CONTROLE HIDRÁULICO .....	88
<b>5 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>89</b>
5.1 CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO .....	89
5.2 COMPRIMENTO APARENTE DO RESSALTO HIDRÁULICO .....	90
5.2.1 Comprimento do ressalto hidráulico convencional .....	90
5.2.2 Comprimento do ressalto hidráulico efluente de <i>flaring piers</i> .....	90

5.3 ANÁLISE DA CARACTERIZAÇÃO DA FOSSA DE EROSÃO .....	93
5.3.1 Profundidade de Erosão .....	93
5.3.2 Altura da Barra .....	95
5.3.3 Volume total erodido .....	97
5.3.4 Controle Hidráulico .....	98
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>100</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>103</b>
<b>APÊNDICE A – PERFIL E PLANTA DO CANAL EXPERIMENTAL .....</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE B – PLANTA DAS ALTERNATIVAS .....</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICE C – PADRÃO DO ESCOAMENTO DAS ALTERNATIVAS .....</b>	<b>114</b>
<b>APÊNDICE D – COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO DE CADA ALTERNATIVA .....</b>	<b>118</b>
<b>APÊNDICE E – RESULTADOS BRUTOS DAS PROFUNDIDADES DAS FOSSAS DE EROSÃO DAS ALTERNATIVAS .....</b>	<b>123</b>
<b>ANPÊNDICE F – PERFIL LONGITUDINAL AO LONGO DO EIXO CENTRAL DO CANAL EXPERIMENTAL .....</b>	<b>144</b>
<b>APÊNDICE G – REPRESENTAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE EROSÃO .....</b>	<b>154</b>
<b>APÊNDICE H – COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO .....</b>	<b>175</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No contexto atual do Brasil, dentre os fatores principais para a implantação de obras de infraestrutura estão a viabilidade econômica, as questões socioambientais, assim como os interesses políticos. Apesar da necessidade evidente de se implantar serviços de infraestrutura com qualidade para a sociedade incluindo transporte, saneamento ambiental, provimento de energia, entre outros, é imperativo que sejam atendidas as condicionantes citadas. Nas obras de infraestruturas, como usinas hidrelétricas, é indispensável a busca contínua por soluções de engenharia mais econômicas, de forma a viabilizar os projetos sem negligenciar a qualidade e a segurança dos empreendimentos, eliminando, minimizando ou mitigando sempre que possível os impactos socioambientais.

O vertedouro é a estrutura de um aproveitamento hidráulico que tem por função extravasar a vazão excedente, de modo a garantir que não sejam ultrapassados os níveis de água fixados no projeto de acordo com as características do aproveitamento.

O descarregamento de cheias apresenta grande quantidade de energia potencial a montante da barragem, a qual é transformada em energia cinética, que deve ser reduzida antes de atingir o leito do rio para que não venha a causar erosões ou danos a jusante. Dessa forma, a estrutura de dissipação de energia deve ser cuidadosamente dimensionada, escolhendo-se a melhor solução do ponto de vista da eficiência hidráulica e da economia, sem negligenciar a segurança do empreendimento.

Os critérios de dimensionamento de estruturas de dissipação de energia utilizados atualmente foram desenvolvidos no início do século XX. Com o esgotamento do potencial hidráulico dos Estados Unidos e dos países europeus, os estudos sistemáticos sobre esse assunto diminuíram consideravelmente nesses países. Com isso, abriu-se uma lacuna para o aprimoramento no conhecimento dessa disciplina entre os países com grande potencial hidráulico ainda a ser explorado, e com particular destaque, a China que aumentou sua parcela de produção de energia através de fontes hidrelétricas nos últimos 15 anos (TOLMASQUIM, 2016), impulsionada por um intenso processo de desenvolvimento econômico. Sendo assim, a construção de novas barragens levou ao desenvolvimento de soluções inovadoras para a dissipação de energia de seus vertedouros.

Segundo Gao, Liu e Guo (2000), uma das soluções desenvolvidas na China foram os *flaring piers*, que representam o estado da arte da engenharia hidráulica chinesa. Essa solução tem sido aplicada em vários projetos, a partir de um trabalho sistemático realizado desde 1970. Essas estruturas são caracterizadas pelo estreitamento da calha do vertedouro, realizado por meio do alargamento gradual da largura dos pilares no sentido do fluxo, de forma a alterar as características do escoamento, o que resulta em maior eficiência na dissipação de energia.

No Brasil o estudo dos *flaring piers* foi abordado pela primeira vez por Lara (2011), que estudou a eficiência hidráulica dessas estruturas associadas a vertedouros do tipo salto de esquí, e citou a importância em estudá-las associadas a outros tipos de dissipadores de energia, como por exemplo, bacias de dissipação.

Apesar da insistente procura por artigos para se adotar uma solução com *flaring piers* no Brasil, a literatura científica chinesa não tem facilitado o aprendizado dessa nova técnica. As publicações apresentam a solução de maneira qualitativa, e não foram encontrados critérios para sua aplicação. Entretanto, há indicações de resultados positivos obtidos com a implantação dos *flaring piers*, o que desperta o interesse na compreensão adequada de seu funcionamento.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Estudo exploratório comparativo da erosão e das características do escoamento a jusante de pilares de seção variável (*flaring piers*) através de diferentes parâmetros geométricos como a razão de contrações e o ângulo de deflexão.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o padrão do escoamento contraído através *flaring piers*;
- Observar a redução do comprimento do ressalto hidráulico formado a partir de escoamento contraído pelos *flaring piers*;
- Caracterizar a fossa de erosão formada após ensaios com concepção de fundo móvel para diferentes parâmetros geométricos dos pilares;



- Avaliar o controle hidráulico exercido pelo alargamento dos pilares, ou seja, a eventual diminuição da capacidade de descarga do vertedouro por influência da contração.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O Brasil possui um potencial hidrelétrico de 247 GW (ELETROBRÁS, 2016). Destes, 94 GW já se encontram em operação, 14 GW encontram-se em construção, 5 MW encontram-se na fase de projeto básico e 16 GW encontram-se na fase de viabilidade. Restam 21 GW que estão na fase de inventário, 21 MW que correspondem a potencial hidrelétrico individualizado e 25 MW que correspondem a potencial hidrelétrico remanescente.

Considerando o potencial hidrelétrico disponível nas fases de inventário e viabilidade, que possuem alta probabilidade de serem implementados a curto e médio prazos, existem cerca de 88 GW a serem explorados no Brasil, com a oportunidade de aplicação de novas tecnologias.

A maior parte do potencial hidrelétrico a ser explorado no Brasil encontra-se na Bacia Amazônica, que representa 44% do total (ELETROBRÁS, 2016). A Bacia Amazônica é predominantemente sedimentar que, em geral, é formada por rochas de resistência mais frágil. Esse potencial hidrelétrico ainda a ser explorado no país, associado à predominância de regiões geologicamente desfavoráveis, reforçam a necessidade em se estudar alternativas para o dimensionamento de dissipadores de energia eficientes, adequados à viabilidade econômica do empreendimento.

Ressalta-se que não é apenas o aspecto geológico que influencia o projeto de bacias de dissipação, mas principalmente a vazão específica do vertedouro associada à carga hidráulica do aproveitamento, ou seja, a diferença entre os níveis de água de montante e de jusante. Conceitualmente, quanto maior a vazão específica do vertedouro, maior é a energia a ser dissipada (NOVAK et al., 2007).

Há diversos aproveitamentos hidráulicos no Brasil que podem ter suas estruturas de dissipação otimizadas. A Tabela 1 apresenta informações de nove aproveitamentos hidrelétricos (AHE) brasileiros, ainda em fase de viabilidade, e que possuem em sua concepção a bacia de dissipação como dispositivo de dissipação de energia. Ainda, esses aproveitamentos têm em comum vertedouros projetados para elevadas vazões específicas.

TABELA 1 – AHE’S EM FASE DE VIABILIDADE NO BRASIL

Aproveitamento	Carga Hidráulica do Vertedouro (m)	Vazão de Projeto do Vertedouro (m <sup>3</sup> /s)	Largura Total do Vertedouro (m)	Vazão Específica do Vertedouro (m <sup>3</sup> /s.m)
AHE Apertados	27,64	12.461,30	130,32	95,62
AHE Ercilândia	16,89	12.975,20	119,76	108,34
AHE Comissário	36,97	11.056,40	111,16	99,46
AHE Foz do Piquiri	16,67	13.412,90	160,80	83,41
AHE Telêmaco Borba	47,25	8.158,00	95,20	85,69
AHE Jatobá	15,37	54.027,00	363,50	148,63
AHE São Luiz do Tapajós	29,53	59.836,00	434,00	137,87
AHE Água Limpa	9,90	2.734,00	54,40	50,26
AHE Baguari	17,30	12.600,00	84,00	150,00

FONTE: [www.aneel.com.br](http://www.aneel.com.br).

O presente estudo visa entender a eficiência dos pilares de seção variável a jusante de estruturas hidráulicas para avaliação da efetiva otimização que essas estruturas podem proporcionar no dimensionamento de dissipadores de energia.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 ASPECTOS GERAIS DA DISSIPAÇÃO DE ENERGIA

A implantação de uma barragem em um rio cria um desnível entre montante e jusante dela. Há, portanto, uma consequente aceleração do escoamento em sua transposição, o que resulta em fluxos de alta velocidade. O escoamento efluente caracteriza-se pela alta energia cinética, havendo sempre uma energia residual a ser dissipada. Essa energia exercerá uma ação erosiva no leito do rio a jusante, o que requer medidas para proteção da região.

Conforme Novak et al. (2007), a dissipação de energia em barragens está associada ao projeto do vertedouro, particularmente com a vazão específica ( $q$ ), diferença entre os níveis de montante e de jusante de água ( $H$ ) e condições geomorfológicas de jusante do aproveitamento. Conceitualmente, quanto maior a vazão específica do vertedouro, maior é a dificuldade em se dissipar a energia residual.

Ao longo da calha do vertedouro, normalmente a dissipação de energia é pequena, sobretudo em vertedouros curtos e com contorno da ogiva liso (NEIDERT, 1980). Assim, altas concentrações de energia são comuns na região de jusante do vertedouro, e ações hidrodinâmicas como oscilações de velocidade e pressão são recorrentes.

Muitos autores buscam classificar as formas de dissipação de energia. Como exemplo, Khatsuria (2005) classifica os dissipadores de energia baseado em mais de um critério. De acordo com a ação hidráulica, a dissipação de energia pode ocorrer pela turbulência e fricção interna do jato, como no caso de bacias de dissipação por ressalto hidráulico, ou pelo impacto do jato no leito, devido à oscilação de pressões hidrodinâmicas. Baseado na direção, os dissipadores podem ser horizontais (ressalto hidráulico clássico), verticais (jato livre) ou oblíquos (jatos espaciais ou cruzados). Baseado na geometria da área transversal do jato, a dissipação pode ocorrer pela expansão ou contração do fluxo. E por fim, baseado na geometria da estrutura, os dissipadores podem ser classificados como bacias de dissipação, com adendos ou não, bacias defletoras, entre outros.

A escolha da concepção da dissipação de energia está diretamente relacionada com as características do aproveitamento.

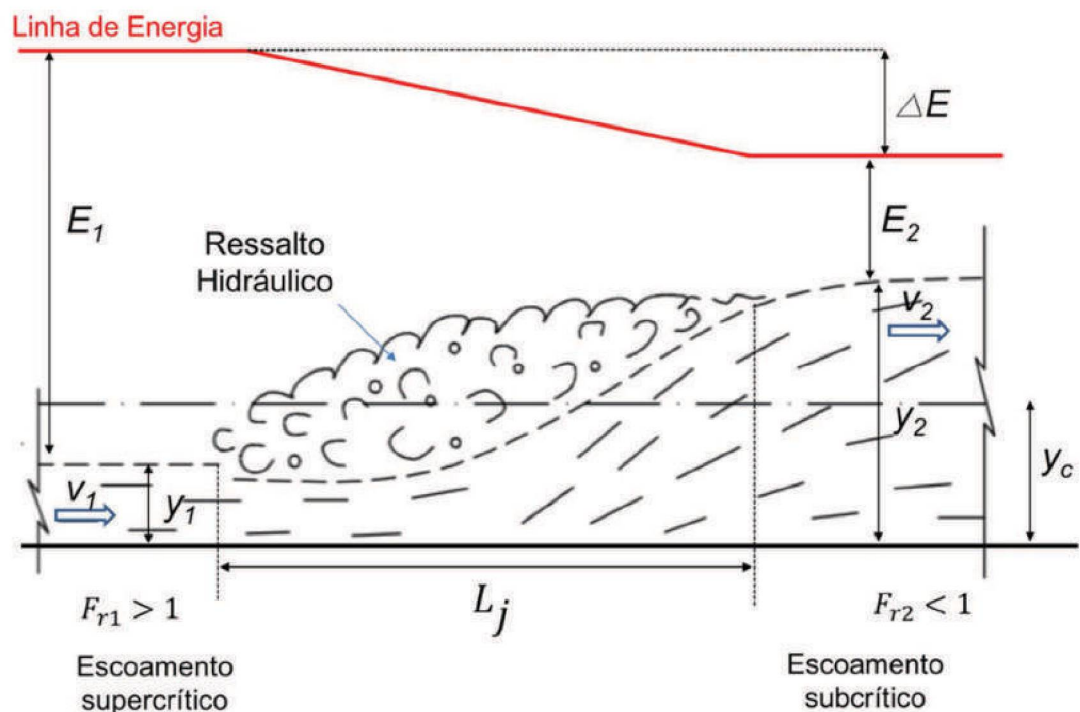
## 2.2 DISSIPACÃO DE ENERGIA POR RESSALTO HIDRÁULICO

A presente pesquisa é focada na dissipação de energia por ressalto hidráulico. Em protótipos, implanta-se bacias de dissipação a jusante de vertedouros para proteção do leito do rio das oscilações de velocidade e pressão decorrentes do ressalto hidráulico.

A bacia de dissipação por ressalto hidráulico é uma das formas mais adotadas pelos projetistas no processo de tranquilização do escoamento. Elas podem estar posicionadas na direção horizontal ou inclinada e ser equipadas com acessórios, na própria bacia ou no próprio vertedouro, como blocos dissipadores na calha, pilares defletores, ou dentes ao final da ogiva.

O ressalto hidráulico e os parâmetros que os definem estão representados na Figura 1.

FIGURA 1 – PARÂMETROS DO RESSALTO HIDRÁULICO



FONTE: Adaptado de Yin, Liang e Gong (2010).

Onde:

$y_1$  = Altura da lâmina d'água a montante do ressalto hidráulico (m);

$y_2$  = Altura da lâmina d'água a jusante do ressalto hidráulico (m);



$y_c$  = Profundidade crítica do escoamento (m);

$v_1$  = Velocidade média do escoamento a montante do ressalto hidráulico (m/s);

$v_2$  = Velocidade média do escoamento a jusante do ressalto hidráulico (m/s);

$Fr_1$  = Número de Froude a montante do ressalto hidráulico (adimensional);

$Fr_2$  = Número de Froude a jusante do ressalto hidráulico (adimensional);

$E_1$  = Parcela de energia a montante do ressalto hidráulico (m);

$E_2$  = Parcela de energia a jusante do ressalto hidráulico (m);

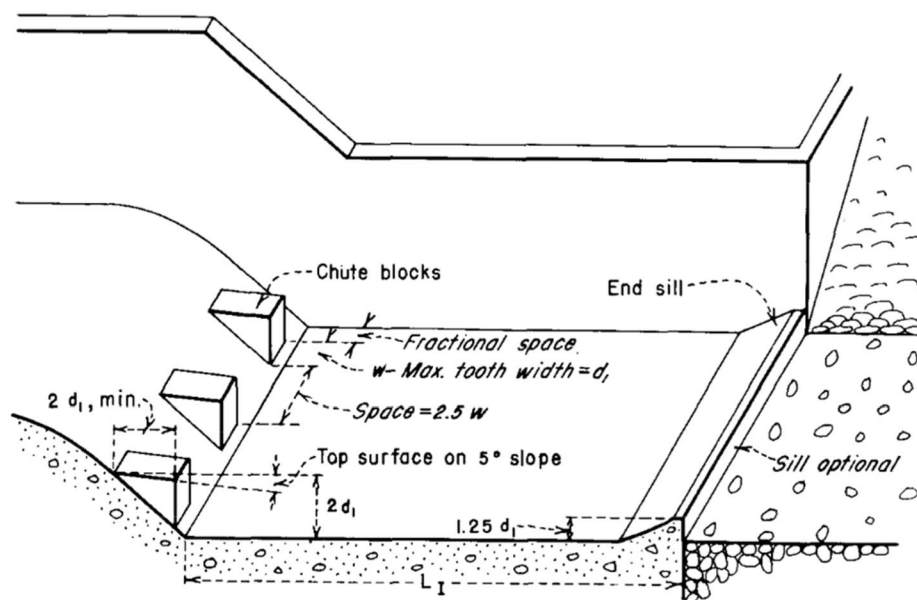
$\Delta E$  = Parcela de energia dissipada (m);

$L_j$  = Comprimento do ressalto hidráulico (m).

Essa concepção representa a solução clássica e natural para a transformação de energia cinética em potencial (variação de  $y_1$  para  $y_2$ ). O ressalto hidráulico é um fenômeno natural que ocorre devido à uma descontinuidade no escoamento, quando este passa do regime supercrítico para o subcrítico. Nessa transição, o escoamento é caracterizado por uma elevação brusca do nível d'água em uma distância curta, com diminuição da sua velocidade média. Trata-se de um fenômeno altamente turbulento, no qual ocorre a formação de vórtices, com grande incorporação de ar ao escoamento e intensa oscilação de velocidade e pressão, o que faz grande parte da energia cinética inicial ser transformada em calor e, em menor escala, em ruído. Essa transformação da energia cinética está diretamente relacionada com a dissipação de energia ( $\Delta E$ ). O ressalto transforma o escoamento torrencial agressivo em um escoamento fluvial com menor capacidade erosiva. Por este motivo, o ressalto hidráulico é largamente utilizado como dissipador de energia.

Um dissipador de energia pode ser constituído por uma estrutura de concreto com extensão e resistência suficientes para conter o ressalto em seu interior. Há, portanto, que se focar qual é o comprimento do ressalto para cada projeto. Uma tentativa de propiciar melhor dissipação de energia e encurtar a bacia é a introdução de blocos e soleira, como mostra a Figura 2.

FIGURA 2 – BACIA DE DISSIPAÇÃO COM ADENDOS – BLOCOS E SOLEIRAS



FONTE: Peterka, 1983.

Os blocos dissipadores podem sofrer danos por cavitação, devido às pressões negativas geradas ao seu redor. Esse fenômeno é mais frequente quando da operação assimétrica de vertedouros.

Ainda, os principais problemas relacionados às bacias de dissipação, elencados por Neidert (1980) são o rompimento das lajes de fundo por excesso de flutuação de pressão ou problemas no sistema de drenagem, problemas de cavitação sobretudo quando da implantação de blocos, ações abrasivas decorrentes de material carregado para o interior da bacia, especialmente na ocorrência de correntes de retorno consequentes de operações assimétricas ou até mesmo efeitos erosivos a jusante da estrutura resultante de seu subdimensionamento ou avaliação incompleta da resistência do maciço rochoso a jusante.

Os critérios de dimensionamento de bacias de dissipação por ressalto hidráulico dependem das condições hidráulicas do escoamento de montante do ressalto ( $y_1$ ,  $v_1$ , e  $Fr_1$ ), e das condições do escoamento a jusante do ressalto ( $y_2$ ). Com essas informações, é possível determinar o comprimento e a largura da bacia de dissipação, assim como a cota da soleira.

Resume-se na sequência os principais conceitos sobre ressalto hidráulico.

### 2.2.1.1 Classificação do ressalto hidráulico quanto ao número de Froude

Considerando que o ressalto hidráulico é um fenômeno que ocorre com superfície livre, os aspectos gravitacionais são relevantes e suas características físicas variam conforme o número de Froude do escoamento de montante ( $Fr_1$ ).

Uma das classificações do ressalto hidráulico conforme o número de Froude foi proposta por Peterka (1983), conforme apresentada a seguir.

- $Fr_1 = 1,0 \rightarrow$  Escoamento crítico: não ocorre ressalto hidráulico;
- $1,0 < Fr_1 < 1,7 \rightarrow$  Ressalto ondular: o escoamento de montante está ligeiramente abaixo da altura crítica e a mudança do regime rápido para o lento corresponde a uma sutil perturbação da superfície do escoamento;
- $1,7 < Fr_1 < 2,5 \rightarrow$  Pré-ressalto: o ressalto é considerado fraco, havendo uma pequena turbulência na superfície do escoamento, e a taxa de dissipação de energia é muito baixa;
- $2,5 < Fr_1 < 4,5$  – Ressalto oscilante: também considerado de transição, já que não há o desenvolvimento completo do ressalto, e a dissipação de energia é cerca de 25% a 50%;
- $4,5 < Fr_1 < 9,0$  – Ressalto estável: o ressalto mantém a maior parte da turbulência dentro de si, promovendo dissipação de energia na ordem de 50% a 70%;
- $Fr_1 > 9,0$  – Ressalto efetivo: a superfície d'água torna-se bastante agitada, gerando fortes ondas a jusante do ressalto, com taxas de dissipação de energia acima de 70%.

Quanto maior o número de Froude de montante do ressalto hidráulico, maior é a taxa de dissipação de energia, o que faz desse parâmetro relevante no dimensionamento de estruturas dissipadoras, sobretudo bacias de dissipação.

### 2.2.1.2 Profundidades conjugadas do ressalto hidráulico

As profundidades conjugadas do ressalto hidráulico são a profundidade da lâmina d'água na seção de montante ( $y_1$ ), também conhecida como profundidade conjugada rápida ou supercrítica, e a profundidade da lâmina d'água na seção de jusante ( $y_2$ ), também conhecida como profundidade conjugada lenta ou subcrítica. As profundidades conjugadas estão ilustradas na Figura 3.



Bélanger (1828) realizou a primeira determinação analítica das alturas conjugadas através da equação de conservação da quantidade de movimento considerando que há uma brusca mudança na força hidrostática das seções de início e de fim do ressalto. Também foi considerada a distribuição de velocidades uniformes em um canal de seção retangular e fundo horizontal plano, sob o escoamento permanente. Desprezando-se a tensão de cisalhamento junto ao fundo do canal, Bélanger propôs a Equação das Profundidades Conjugadas (Equação 1).

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad (1)$$

A Equação 1 pode ser escrita em função do número de Froude de jusante, (Equação 2).

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr_2^2} - 1 \right) \quad (2)$$

Rajaratnam (1965) desenvolveu uma equação para a determinação das profundidades conjugadas do ressalto hidráulico considerando o termo adicional da tensão de cisalhamento desprezada por Bélanger (1828). Entretanto, devido ao fato de que o ressalto é uma transição curta, os resultados para efeitos práticos foram muito semelhantes aos encontrados através das Equações 1 e 2, de forma que esta é a mais utilizada para caracterização do ressalto hidráulico atualmente.

#### 2.2.1.3 Comprimento do ressalto hidráulico

O comprimento do ressalto hidráulico é um importante parâmetro utilizado no dimensionamento de bacias de dissipação. Por ser um fenômeno altamente turbulento caracterizado por grandes oscilações de pressão e velocidade, não há consenso na bibliografia em relação à determinação da seção final do ressalto hidráulico. Na engenharia hidráulica o importante é conhecer o comprimento para o qual o ressalto hidráulico não causa danos a jusante do vertedouro.

Segundo Elevatorski (1959), o ressalto hidráulico termina quando não existem mais grandes variações de níveis. Rajaratnam (1967) define a posição de fim do



ressalto hidráulico onde sua altura encontra a altura conjugada lenta. Hager (1992) define a seção final do ressalto como sendo aquela em que a superfície livre é essencialmente horizontal, a agitação da superfície é diminuída, o escoamento não apresenta aeração excessiva e as condições de escoamento gradualmente variado desaparecem.

A Tabela 2 apresenta equações para a determinação do comprimento do ressalto hidráulico proposta por alguns autores:

TABELA 2 – EQUAÇÕES DE COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO

<b>Autor</b>	<b>Equação</b>
Riegel e Beebe (1917)	$L_j \cong 5(y_2 - y_1) \quad (3)$
Safranez (1927)	$L_j \cong 5,2y_2 \quad (4)$
Douma (1934)	$L_j = 5,2y_2 \quad (5)$
Ludin e Barnes (1934)	$L_j = \left(4,5 - \frac{v_1}{v_c}\right)y_2 \quad (6)$
Woycicki (1934)	$L_j = (y_2 - y_1) \cdot \left(8 - \frac{0,05y_2}{y_1}\right) \quad (7)$
Smetana (1934)	$L_j \cong 6(y_2 - y_1) \quad (8)$
Chertoussouv (1935)	$L_j = 10,3y_1(Fr_1 - 1)^{0,81} \quad (9)$
Aravin (1935)	$L_j = 5,4(y_2 - y_1) \quad (10)$
Page (1935)	$L_j = 5,6y_2 \quad (11)$
Bakhmeteff-Matzke (1936)	$L_j = 5(y_2 - y_1) \quad (12)$
Ivanchenko (1936)	$L_j = 10,6(y_2 - y_1)(Fr_1^2)^{-0,185} \quad (13)$
Ludin (1936)	$L_j = \frac{y_2}{\left[0,22 - 0,17\left(\frac{v_c}{v_1}\right)\right]} \quad (14)$
Kinney (1941)	$L_j = 6,02(y_2 - y_1) \quad (15)$
Posey (1941)	$L_j = 4,5 - 7(y_2 - y_1) \quad (16)$
Wu (1949)	$L_j = 10(y_2 - y_1)Fr_1^{-0,16} \quad (17)$
Peterka (1957)	$L_j = 6,1y_2 \quad (18)$
Elevatorski (1959)	$L_j = 6,9(y_2 - y_1) \quad (19)$
Silvester (1964)	$L_j = 9,75y_1(Fr_1 - 1)^{1,01} \quad (20)$
Hager et al. (1992)	$L_j/y_1 = 220tgh[(Fr_1 - 1)] \quad (21)$
Marques et al (1997)	$L_j = 8,5(y_2 - y_1) \quad (22)$
Teixeira (2003)	$L_j = 8(y_2 - y_1) \quad (23)$

FONTE: Alves, 2008; Schulz et al., 2015.

## 2.3 FLARING PIERS

A partir da década de 70 ficou em evidência na China a implantação de aproveitamentos hidrelétricos de alta queda, alta vazão, grande potência descarregada e alta vazão específica (GAO; LIU; GUO, 2000). Ainda, devido aos baixos números de Froude associados a esses aproveitamentos, foram necessárias estruturas de dissipação de energia maiores.

Esses fatores levaram a engenharia chinesa a estudar soluções alternativas de dissipação de energia. Uma das tecnologias desenvolvidas foram os chamados *flaring piers*, também encontrados na literatura como *flaring gate piers*. Os *flaring piers* são contrações no escoamento propiciadas pelos pilares ou pelos muros dos vertedouros, com o objetivo de melhorar a eficiência da dissipação de energia. Essas contrações são posicionadas na direção do escoamento.

O princípio do funcionamento dos *flaring piers* é a contração rápida do escoamento através dos pilares, levando a um jato de formato estreito e alto ao longo do vertedouro. O choque dos jatos leva à formação de vórtices turbulentos com diferentes tamanhos, ocasionando um ambiente propício para a incorporação de ar. Dessa forma, uma grande parcela da energia cinética é dissipada, e a velocidade no fundo da região de impacto é reduzida. A Figura 3 ilustra o escoamento através de *flaring piers* no vertedouro da usina de Dachaochan, onde é possível visualizar o estreitamento e alongamento vertical do jato logo a jusante dos pilares.

FIGURA 3 – ESCOAMENTO NO VERTEDOIRO DE DACHAOSHAN



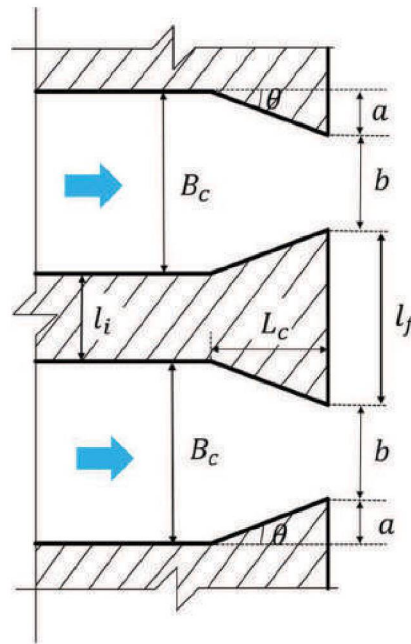
FONTE: <[onnyys.tumblr.com/post/100811852887/the-mekong-cascade](https://onnyys.tumblr.com/post/100811852887/the-mekong-cascade)>.

### 2.3.1 Parâmetros Geométricos dos *Flaring Piers*

Os *flaring piers* situam-se a jusante da ogiva dos vertedouros, tendo sua contração gradualmente aumentada no sentido do fluxo.

Os principais parâmetros geométricos que caracterizam os *flaring piers* são a razão de contração ( $\eta$ ) e o ângulo de deflexão ( $\theta$ ). A razão de contração representa o percentual de estreitamento da área do vão do vertedouro, e o ângulo de deflexão impacta diretamente na mudança de direção das linhas de corrente do escoamento. A Figura 4 representa dois vãos de um vertedouro, delimitados por um pilar e dois meios pilares, indicando esses parâmetros.

FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO EM PLANTA DOS FLARING PIERS



Os parâmetros geométricos dos *flaring piers* são definidos pelas equações a seguir:

$$\eta = \frac{b}{B_c} \quad (24)$$

$$a = \frac{B_c - b}{2} \quad (25)$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{a}{L_c}\right) \quad (26)$$

$$l_f = l_i + 2a \quad (27)$$

Onde:

$\eta$  – Razão de contração (adimensional);

$b$  – largura da calha na seção mais estreita da contração (m);

$B_c$  - Largura original da calha (m);

$\theta$  - ângulo de deflexão ( $^\circ$ );

$a$  – deslocamento da aresta vertical do muro ou pilar decorrente do ângulo de deflexão (m);

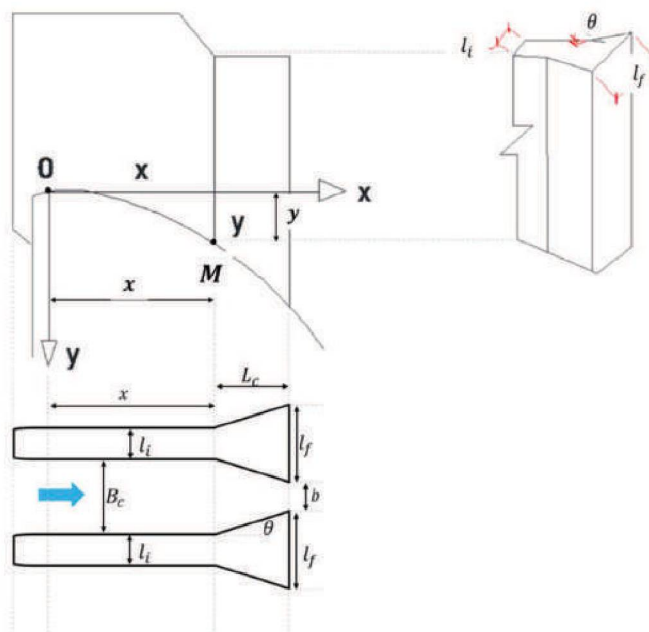
$L_c$  – Comprimento do trecho de contração da calha (m);

$l_i$  - largura inicial do pilar (m);

$l_f$  - largura final do pilar (m).

Outro parâmetro importante é a posição de início do alargamento dos pilares, representada na Figura 5 pelo ponto  $M$ . Esse parâmetro pode influenciar na capacidade de descarga do vertedouro. Apesar de alguns autores como Li et al. (2003) e Mo et al. (2007) proporem métodos de cálculo para esse parâmetro, não existe consenso na bibliografia sobre sua definição.

FIGURA 5 – INÍCIO DO ALARGAMENTO DOS FLARING PIERS



FONTE: Adaptado de Li et al. (2003).



Onde:

M – Ponto de início do alargamento dos *flaring piers*;

x – Distância segundo a horizontal da crista da ogiva do vertedouro até o início do alargamento dos pilares (m);

y – Distância segundo a vertical da crista da ogiva do vertedouro até o início do alargamento dos pilares (m).

A Tabela 3 apresenta alguns aproveitamentos hidrelétricos, todos localizados na China, onde foram implantados os *flaring piers* e os respectivos parâmetros adotados.

TABELA 3 – APROVEITAMENTOS COM VERTEDOUROS COM FLARING PIERS

Aproveitamento	Rio	Q (m <sup>3</sup> /s)	q (m <sup>3</sup> /s.m)	$\eta$	$\theta$
Ankang	Hanjiang	36.700	197	0,4	21,8°
Baise	You		178	0,343	20,97°
Dachaoshan	Lancang	9.992	135	0,4	21,8°
Geheyang	Qiangjiang	21.900		0,3	11,05°
Panjiakou	Luan	54.400	208	0,66	15 ~20°
Silin	Wu	26.600	282	0,423	20,55°
Shatuo	Wujiang	32.020	305	0,33	24,44°
Suofengying	Wu	11.635	179	0,4615	19,29°
Wuqiangxi	Yuan	18.360	244	0,368	16,7°
Yantan	Hongshui	32.700	241	0,5 ~0,53	15 ~18 °

FONTE: Li (2002); Deng, Lin e Han (2003); Mo et al. (2007); Zhang, Wu e Zheng (2011); Chen e Zhang (2015); Hu e Ma (2016).

Nota-se pela Tabela 3 que todos os aproveitamentos possuem altas vazões específicas. Ressalta-se que essa vazão específica corresponde à vazão que escoava pela largura original do vertedouro ( $B_c$ ), a montante do alargamento dos pilares.

Também é importante notar a faixa de abrangência dos parâmetros geométricos. As razões de contração variam de 0,30 a 0,66, sendo mais comum próximo a 0,40. Os ângulos de deflexão variam de 11° a 25°. Não foi encontrado pela autora publicações que justifiquem a adoção dessa faixa de valores, para esses parâmetros geométricos.

Outros aproveitamentos hidrelétricos em cujos vertedouros foram aplicados os *flaring piers* foram encontrados na pesquisa. Entretanto, para muitos deles não se

encontraram os parâmetros básicos ( $\eta$  e  $\theta$ ) que os definem. Esses aproveitamentos estão citados no trabalho sob os aspectos da geometria e da associação dos *flaring piers* com outros dissipadores de energia.

### 2.3.2 Tipos de Geometria de Flaring Piers

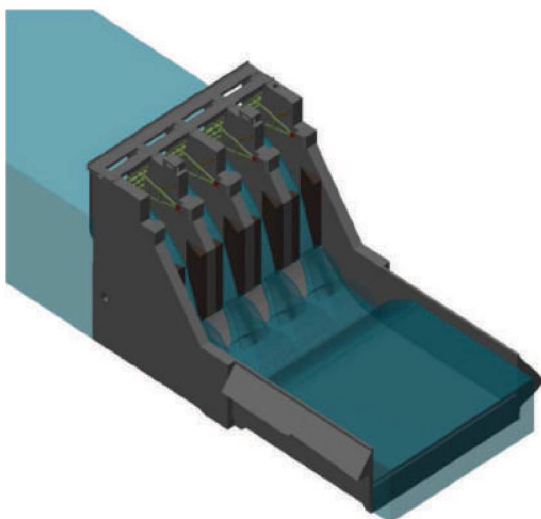
Os *flaring piers* podem ser classificados conforme sua seção transversal. Nesse sentido, os pilares podem ter formato retangular, em Y, X, V ou T, simétrica ou não (WEI, 2013). Ressalta-se que apesar da literatura apresentar a geometria conforme a seção do pilar, o formato está de fato relacionado à área de escoamento entre os vãos.

Na sequência são descritos cada tipo de geometria, e apresentadas algumas aplicações em aproveitamentos hidráulicos chineses.

#### 2.3.2.1 Pilares de Seção Retangular

A seção retangular caracteriza-se por ser constante ao longo do eixo vertical do pilar, ou seja, para qualquer altura de lâmina d'água sobre a crista do vertedouro a razão de contração do escoamento é sempre a mesma. Um esquema dessa geometria é apresentado na Figura 6, e uma aplicação, na Figura 7, que mostra o vertedouro da usina de Baise.

FIGURA 6 – PERSPECTIVA DE UM PILAR DE SEÇÃO RETANGULAR



FONTE: Cruz (2016).

FIGURA 7 – PILAR RETANGULAR NA USINA DE BAISE

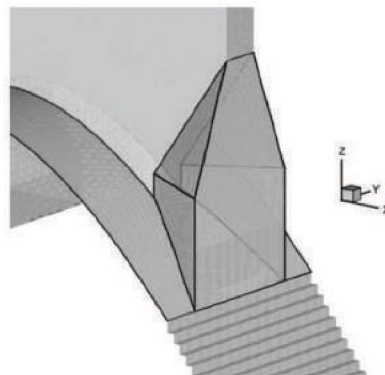


FONTE: RCC Dams < [www.rccdams.co.uk/dams/baise/](http://www.rccdams.co.uk/dams/baise/)>.

#### 2.3.2.2 Flaring Piers de Seção em Y

Os pilares alargados com seção transversal em Y são os mais aplicados em vertedouros de barragens construídas na China (ZHANG; WU; ZHENG, 2011). Eles se caracterizam pelo alargamento constante do pilar no sentido do escoamento, e a partir de uma determinada elevação na porção superior, gradativamente a seção alargada retorna à largura original do pilar, conforme ilustrado na Figura 8.

FIGURA 8 – PERSPECTIVA DE UM PILAR DE SEÇÃO Y



FONTE: Zhang, Wu e Zheng (2011).

Em estruturas com essa geometria, o aumento da área de escoamento na parte superior minimiza possíveis efeitos de perda de capacidade de descarga do vertedouro por afogamento, devido ao controle hidráulico que o alargamento do pilar pode exercer.



Os pilares alargados com seção em Y foram construídos em diversas usinas chinesas conforme mostra a Figura 9.

FIGURA 9 – VERTEDOUROS COM PILARES COM SEÇÃO Y

Dachaoshan, China



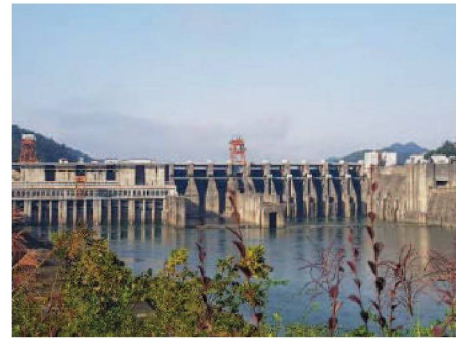
Guandi, China



Jing Hong, China



Wuqiangxi, China



Xixi, China



Yantan, China



Shuidong, China



Taolinkou, China



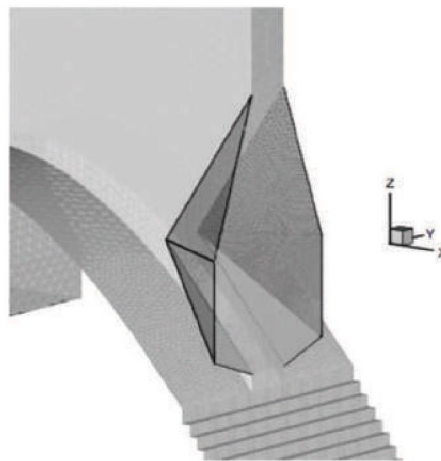


### 2.3.2.3 Flaring Piers de Seção em X

Os pilares alargados com geometria de seção em X surgiram como uma melhoria em relação aos pilares de seção Y, uma vez que propiciam área maior para a passagem do escoamento também na porção mais próxima à ogiva do vertedouro, não promovendo a contração do escoamento para vazões mais baixas, conforme ilustrado na Figura 10. Zhang, Wu e Zheng (2011) alegam ser esta uma vantagem, especialmente quando os *flaring piers* são associados a vertedouros em degraus, já que permitem que a calha do vertedouro, nesta situação, execute sua função de dissipar energia, sem que o escoamento tenha sido modificado pelo alargamento dos pilares.

Ainda, esta livre passagem permite que ocorra uma camada de escoamento sobre a ogiva do vertedouro que minimiza efeitos de impactos do jato proveniente dos *flaring piers* e reduz possíveis danos na superfície da calha do vertedouro (DAI et al., 2015).

FIGURA 10 – PERSPECTIVA DE UM PILAR DE SEÇÃO X



FONTE: Zhang, Wu e Zheng (2011).

A primeira aplicação dos *flaring piers* com seção X ocorreu no vertedouro da usina de Suofengying (ZHANG; WU; ZHENG, 2011), conforme mostra a Figura 11, que também apresenta os vertedouros das usinas de Ahai, Gonguoqiao e Shatuo.

FIGURA 11 – VERTEDOUROS COM PILARES COM SEÇÃO X

Suofengying, China



Ahai, China



Gongguoqiao, China



Shatuo, China



#### 2.3.2.4 Flaring Piers de Seção em T e em V

Os *flaring piers* de seção em T possuem funcionamento parecido com os pilares de seção em Y, com a diferença de que o retorno para a seção original dos pilares não acontece de forma gradual. Partindo-se do mesmo princípio, os *flaring piers* de seção em V diferem-se dos pilares de seção em Y pois o retorno para a seção original dos pilares é gradual e linear até o topo do pilar, local em que a seção transversal do pilar é equivalente à seção original.

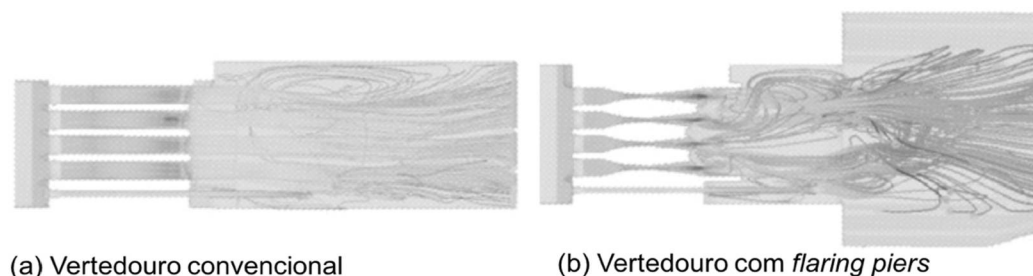
#### 2.3.3 Flaring Piers associados a dissipadores de energia convencionais

A implantação dos *flaring piers* está, na maioria dos casos, associada a uma ou mais estruturas de dissipação de energia convencional. A seguir serão apresentadas algumas dessas associações.

### 2.3.3.1 Flaring Piers associados a bacia de dissipação

A associação dos *flaring piers* com bacias de dissipação ocasiona um escoamento bastante turbulento devido às características do próprio ressalto hidráulico, que se forma na transição do regime supercrítico para o subcrítico, somadas às características do escoamento através dos pilares alargados. Por este motivo, este fenômeno é descrito como “Ressalto Hidráulico 3D” (GAO; LIU; GUO, 2000, CHEN; WANG; HAN, 2009, YIN; LIANG; GONG, 2010). A Figura 12 ilustra a comparação do comportamento do ressalto hidráulico formado após o escoamento passar por pilares convencionais (a) e pelos pilares alargados (b), onde as linhas de corrente tomam direções multidirecionais na fase aérea antes de chegar na bacia de dissipação.

FIGURA 12 – ESCOAMENTO EM BACIA DE DISSIPÇÃO



FONTE: Zhang et al. (2015).

Nesta associação, uma quantidade maior de ar é incorporada ao escoamento, e uma grande parcela de energia cinética presente no fundo da bacia de dissipação é transformada por meio das forças viscosas. O nível da bacia é elevado, aumentando a dissipação de energia. Segundo Chen (2015), esta associação é adequada para vertedouros que estão sujeitos a grandes vazões específicas, médias a altas cargas hidráulicas e baixos número de Froude na aproximação.

As vantagens práticas relatadas são a redução no comprimento da bacia de dissipação (CHEN; WANG; HAN, 2009) e a redução da profundidade de erosão a jusante da estrutura (LIN; LI; CHEN, 1987).

Segundo Gao, Liu e Guo (2006), a primeira aplicação dos *flaring piers* associados a bacia de dissipação ocorreu na barragem de Ankang, conforme ilustra a



Figura 13. Os autores afirmam também que esta foi a primeira obra a provar a eficácia desta estrutura.

FIGURA 13 – VERTIMENTO NA BARRAGEM DE ANKANG



FONTE: [www.industcards.com/hydro-china-other-prov.htm](http://www.industcards.com/hydro-china-other-prov.htm)

Outra aplicação encontrada na bibliografia foi a usina hidrelétrica de Yantan, onde os *flaring piers* foram associados a um defletor submerso e a uma bacia de dissipação, conforme ilustra a Figura 14.

FIGURA 14 – USINA HIDRELÉTRICA DE YANTAN



FONTE: <http://www.chenghsiung.com/image/01.jpg>



A partir de observações da usina de Yantan, Gao, Liu e Guo (2000) afirmam que o padrão de escoamento na bacia é similar aos ressaltos tridimensionais, o que difere bastante do padrão do ressalto hidráulico em bacias convencionais. Os autores afirmam também que a velocidade de fundo do escoamento foi reduzida rapidamente de 30 m/s para 13 m/s. A dissipação de energia mostrou-se bastante eficiente, e não foi observada formação de erosões a jusante da bacia de dissipação. Entretanto, foi observado que o tempo médio de atuação da pressão na bacia de dissipação da usina de Yantan foi maior que os valores conhecidos de bacias convencionais e que as oscilações de pressões são elevadas, mas que decaem rapidamente.

As estruturas de descarregamento de cheias da barragem de Wuqiangxi são compostas por *flaring piers* associados à bacia de dissipação num vertedouro de três vãos na direita hidráulica, e pelos *flaring piers* associados a descarregador de fundo e bacia de dissipação num vertedouro de seis vãos na esquerda hidráulica (Figura 15). A jusante desse aproveitamento houve formação de erosão com profundidade entre 13 e 36 metros. Todavia, Gao, Liu e Guo (2000) afirmam que os danos foram atribuídos a ocorrência de vazões acima dos valores previstos em projeto, a operação irregular de vertedouros por ainda estarem em construção, além de problemas construtivos.

FIGURA 15 – USINA HIDRELÉTRICA DE WUQIANGXI

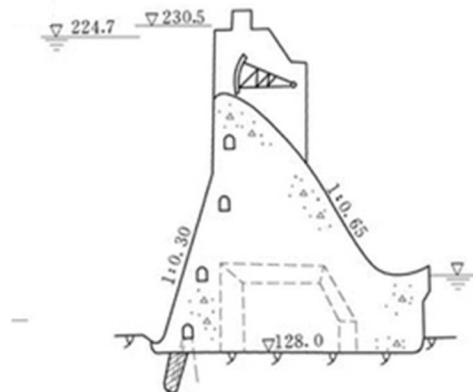


FONTE: [www.msdi.cn](http://www.msdi.cn)

### 2.3.3.2 Flaring Piers associados a bacia defletora

Os *flaring piers* podem ser associados a dissipador do tipo *flip bucket* (bacia defletora). Essa associação foi aplicada na usina hidrelétrica de Panjiakou, cujo vertedouro é apresentado em perfil no esquema da Figura 16.

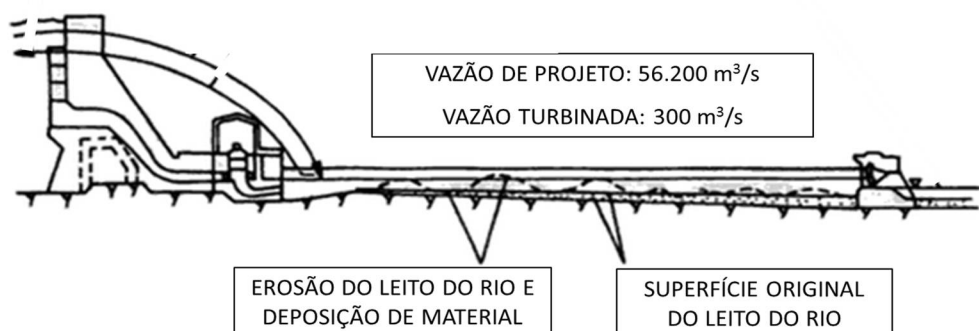
FIGURA 16 – PERFIL DO VERTEDOURO DE PANJIAKOU



FONTE: Chen, 2015.

No vertedouro desta usina há sete vãos posicionados adjacentes à direita hidráulica, e onze vãos adjacentes à esquerda hidráulica. A erosão e a consequente deposição de material a jusante do vertedouro ocasionaram a elevação do nível de água de jusante da usina, resultando em perda de queda (DOUGLAS, 1990), conforme esquema indicado na Figura 17. Dessa forma, para minimizar os efeitos erosivos, foram implantados os *flaring piers* nos três vãos da esquerda hidráulica (PANJIAKOU, 2006).

FIGURA 17 – EROSÃO A JUSANTE DO VERTEDOURO DE PANJIAKOU



FONTE: Douglas, 1990.

### 2.3.3.3 Flaring Piers associados a salto de esqui

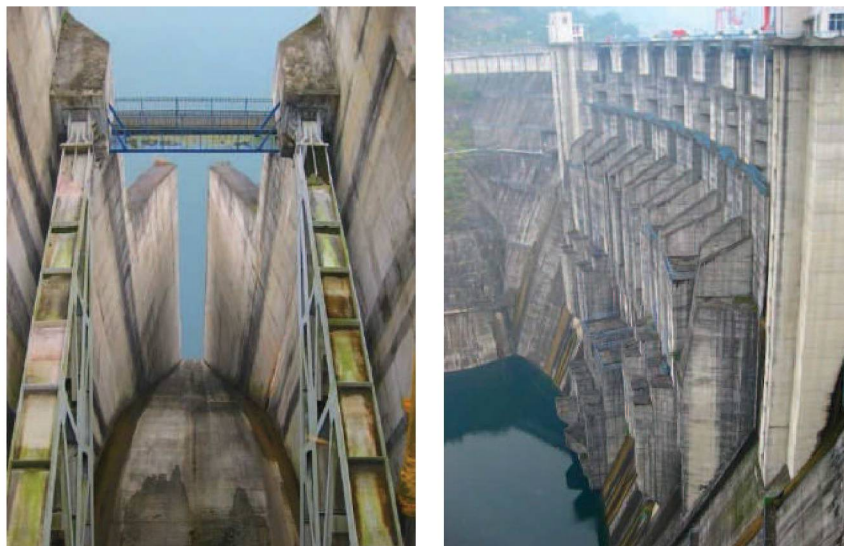
Os *flaring piers* podem ser associados a vertedouros do tipo salto de esqui. Nesse caso, o jato proveniente do salto de esqui é contraído pelos *flaring piers*, suas linhas de corrente chocam-se no ar, que é incorporado ao jato, melhorando a dissipação de energia.

Segundo Gao, Liu e Guo (2000), os *flaring piers* foram combinados com vertedouro do tipo salto de esqui na usina de Geheyan, que está localizada em região de características litológicas com baixa resistência à erosão. O vertedouro dessa usina é composto por um vertedouro de superfície com 7 vãos, nos quais foram implantados os *flaring piers*, e 4 descarregadores intermediários. Foram adotados pilares alargados assimétricos com o objetivo de direcionar os jatos paralelamente ao eixo do rio, buscando preservar a bacia de lançamento do impacto do jato.

Caihuan, Guobing e Yuanming (2002) citam que em estudos experimentais os jatos efluentes dos sete vãos providos de *flaring piers* consumiram bastante energia no ar, e carregaram rolos de ar para dentro da bacia de lançamento, resultando em uma expansão abrupta de volume e ocasionando boa dissipação de energia. Os pilares alargados assimétricos promoveram uma boa dispersão, resolvendo o problema de concentração de energia causado pela forma da barragem.

A Figura 18 mostra o vão estreitado no sentido do escoamento e a assimetria dos pilares do vertedouro de Geheyan.

FIGURA 18 – VERTEDOIRO DA USINA DE GEHEYAN



FONTE: XXX.



#### 2.3.3.4 Flaring Piers associados a vertedouro em degraus

Os *flaring piers* podem ser associados a vertedouros em degraus, conforme já apresentado na sub-subseção 2.3.2.3, que mostrou as vantagens dessa associação com os pilares com geometria tipo X na usina de Suofengying. Nesse caso, para vazões mais baixas não ocorre o estrangulamento do fluxo, que escoar sem ter sido modificado pelos *flaring piers* (ZHANG; WU; ZHENG, 2011).

Essa associação também foi aplicada no vertedouro da usina de Baise, Dachaochan e Shuidong. Nas duas últimas, os *flaring piers* foram aplicados com o objetivo de aumentar a aeração do escoamento e proporcionar suficiente aeração nos degraus.

O vertedouro de Shuidong conta também com uma bacia de dissipação. Segundo Matos e Meireles (2014), logo no início de operação o vertedouro de Shuidong foi submetido a uma cheia de recorrência de 100 anos, que equivaleu a uma vazão específica de  $90 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , e não foi observado o fenômeno de cavitação em seus degraus.

Fritzell, Renna e Matos (2015) relatam que o vertedouro de Dachaochan foi submetido a testes de pressão, concentração de ar e velocidades, as quais chegaram a  $29 \text{ m/s}$ . Foram observadas altas concentrações de ar (32 a 51%), o que proporciona condições seguras de operação em relação à manifestação de cavitações. Deng, Lin e Han (2003) afirmam que os *flaring piers* de Dachaochan são responsáveis por manter 70% da área da calha do vertedouro sem contato com a água. A Figura 19 ilustra um detalhe do vertimento na usina de Dachaochan, onde é possível observar o descolamento do escoamento nos primeiros degraus do vertedouro. A Figura 20 ilustra de forma esquemática o comportamento do escoamento sobre o vertedouro de Dachaochan.

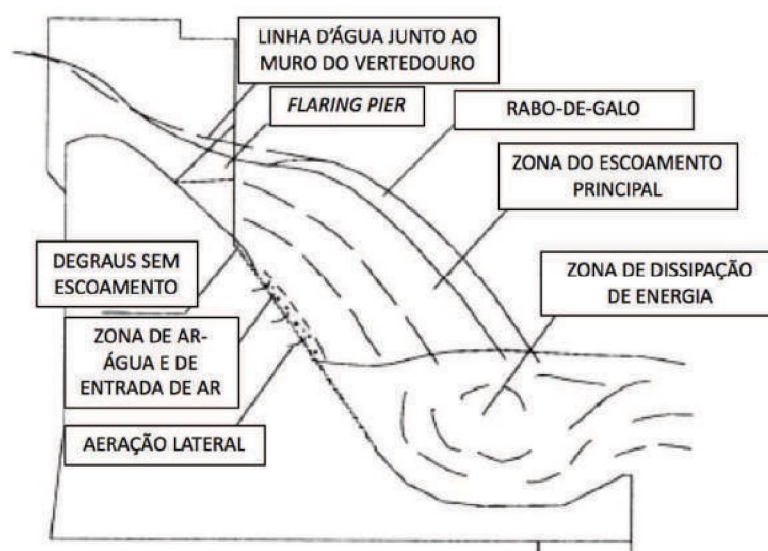
FIGURA 19 – VERTIMENTO SOBRE DEGRAUS – UHE DACHAOSHAN



FONTE: <http://fidic.org/node/1067>.



FIGURA 20 – ESQUEMA DO ESCOAMENTO - UHE DACHAOSHAN



FONTE: adaptado de Terrier (2016).

#### 2.3.4 Estudos Desenvolvidos sobre os Flaring Piers

Os estudos envolvendo os *flaring piers* são escassos e ainda há diversos aspectos a serem explorados para atestar o funcionamento desta solução. A maior parte desses estudos foi realizada na China, e sua divulgação não é tão ampla. Entretanto, algumas publicações abordam trabalhos experimentais e computacionais que tiveram por objetivo avaliar a eficiência dos *flaring piers* e até mesmo sugerir critérios de dimensionamento dessas estruturas.

Alguns estudos abordam apenas um aspecto do dimensionamento, e outros combinam mais de um aspecto. Essa seção apresenta alguns deles, buscando organizá-los conforme a cronologia e a metodologia adotada.

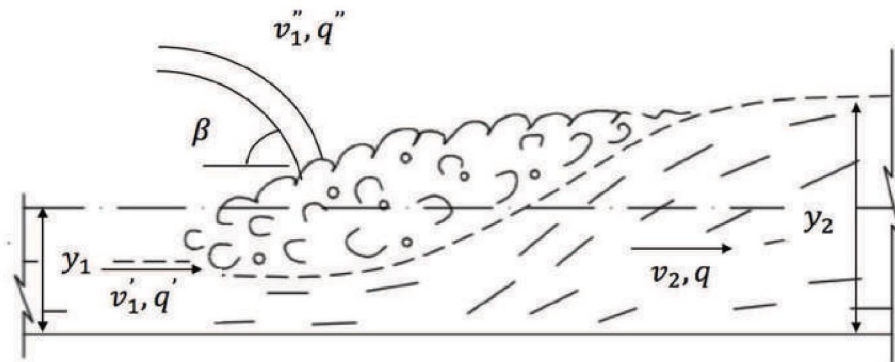
Devido às diferentes nomenclaturas utilizadas pelos autores na determinação dos parâmetros, adotou-se como padronização a adoção do índice (') para referenciar um parâmetro relacionado a um vertedouro dotado de *flaring piers*, sempre que necessário diferenciá-lo de um vertedouro com pilares convencionais. A revisão bibliográfica buscou adaptar sempre que possível os parâmetros conforme a padronização adotada.

##### 2.3.4.1 Relação entre a razão de contração e a profundidade conjugada lenta

Ni (1998) estudou a relação entre a razão de contração ( $\eta$ ) dos *flaring piers* e a profundidade conjugada de jusante do ressalto hidráulico ( $y_2$ ). Para tanto, o autor propôs um método simplificado de dimensionamento baseado no mesmo princípio proposto por Bélanger (1828) quando da dedução da equação das profundidades conjugadas (Equações 1 e 2), que se baseia no teorema da conservação da quantidade de movimento e na equação da continuidade.

O autor dividiu a vazão específica efluente em duas parcelas, sendo uma adjacente à ogiva do vertedouro ( $q'$ ) e outra que escoar através dos vãos contraídos dos pilares ( $q''$ ). A soma das duas parcelas resulta no escoamento total ( $q$ ), conforme apresentado na Figura 21.

FIGURA 21 – PARÂMETROS UTILIZADOS POR NI (1998)



FONTE: adaptado de Ni (1998).

Onde:

$q'$  – parcela da vazão específica que escoar junto à ogiva do vertedouro, após a passagem do fluxo pelos pilares contraídos ( $\text{m}^3/\text{s.m}$ );

$q''$  – parcela da vazão específica que escoar pelos pilares contraídos ( $\text{m}^3/\text{s.m}$ );

$q$  - vazão específica total do escoamento ( $\text{m}^3/\text{s.m}$ ).

Baseado em um conceito de divisão do fluxo equivalente, e partindo-se de uma constante de proporcionalidade que representa a relação da vazão em duas parcelas ( $q'$  e  $q''$ ), Ni (1998) desenvolveu a seguinte relação:

$$\alpha_e = 0,9566 \cdot \eta + 0,1977 \cdot \left(\frac{E_0}{y_c}\right)^{1/2} \quad (28)$$

Onde:

$\alpha_e$  – divisão de fluxo equivalente (adimensional);

$E_0$  – energia no reservatório (m).

Ni (1998) afirma que para que ocorra a divisão do fluxo em duas parcelas e o consequente choque dos jatos, é necessário que se satisfaça a relação  $\alpha_e < 1,00$ .

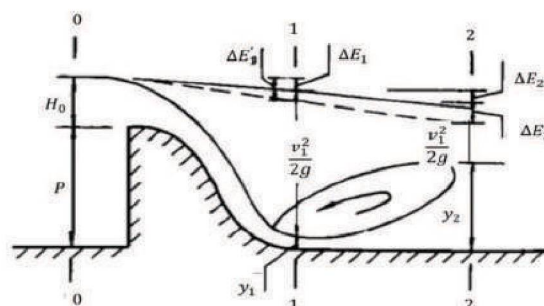
Baseando-se em 21 testes realizados no modelo hidráulico reduzido da usina de Ankang, Ni (1998) aplicou o método, e adotando-se uma razão de contração igual a 0,25 o autor chegou em uma redução da profundidade conjugada de jusante de 8,5%.

#### 2.3.4.2 Influência dos flaring piers na bacia de dissipação

Li et al. (2000) estudaram a associação dos *flaring piers* com bacia de dissipação em modelo hidráulico reduzido. Nesses estudos, os autores avaliaram a influência dos *flaring piers* no escoamento considerando a eficiência na dissipação de energia, a relação entre a razão de contração e a profundidade de jusante do ressalto, e também avaliaram as profundidades de erosão a jusante de bacias de dissipação. Os estudos consideraram a comparação de vertedouro convencional com vertedouro dotado de *flaring piers*. Os autores estudaram razões de contração de 0,40, 0,50 e 0,60, e ângulos de deflexão de 10°, 15° e 20°.

Li et al. (2000) desenvolveram a Equação 29 para determinação da dissipação de energia de vertedouros dotados de *flaring piers*, quando comparada a uma aplicação com pilares convencionais. Os parâmetros dessa equação estão ilustrados na Figura 22.

FIGURA 22 – PARÂMETROS UTILIZADOS POR LI ET AL. (2000)



FONTE: adaptado de Li et al. (2000).

$$\Delta E = \frac{\varphi}{\varphi'} \cdot y_1 \cdot \left( 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\varphi}{\varphi'} \cdot Fr_1^2 \right) - \frac{y_2'}{y_2} \cdot \eta \cdot y_1 \cdot \left( 1 + \frac{1}{2 \cdot \left( y_2' / y_2 \cdot \eta \right)^3} \cdot Fr_1^2 \right) \quad (29)$$

Onde:

$\varphi$  - coeficiente de velocidade do escoamento de pilares convencionais (adimensional);

$\varphi'$  - coeficiente de velocidade do escoamento de *flaring piers* (adimensional);

$y_2'$  – altura da lâmina d'água a jusante do ressalto através de *flaring piers* (m).

Aplicando a Equação 29, os autores compararam a dissipação de energia entre vertedouros convencionais (Alternativa A) e dotados de *flaring piers* (Alternativa B), em modelo hidráulico reduzido, para um escoamento com número de Froude de montante de 3,44 e a relação  $P/H = 1,41$ . Os resultados são mostrados na Tabela 4.

TABELA 4 – COMPARAÇÃO DA ENERGIA DISSIPADA POR LI ET AL (2000)

Alt.	$E_T$	$\varphi$	$y_1$	$y_2$	$E_1$	$\Delta E_1$	$\% \Delta E_1$	$E_2$	$\Delta E_2$	$\% \Delta E_2$	$\Delta E_{total}$
A	0,376	0,880	0,0431	0,191	0,300	0,076	44,2	0,204	0,096	55,8	0,172
B	0,376	0,776	0,0500	0,175	0,248	0,128	69,2	0,194	0,057	30,8	0,185

FONTE: Li et al (2000).

Onde:

$E_T$  - Energia total (m);

$\varphi$  - Coeficiente de velocidade (adimensional);

$\Delta E_1$  – Variação de energia até a seção de montante do ressalto hidráulico (m);

$\% \Delta E_1$  – Percentual de energia dissipada até a seção de montante do ressalto hidráulico (%);

$E_2$  – Energia na seção de jusante do ressalto hidráulico (m);

$\Delta E_2$  – Variação de energia devido ao ressalto hidráulico (m);

$\% \Delta E_2$  – Percentual de energia dissipada devido ao ressalto hidráulico (%);

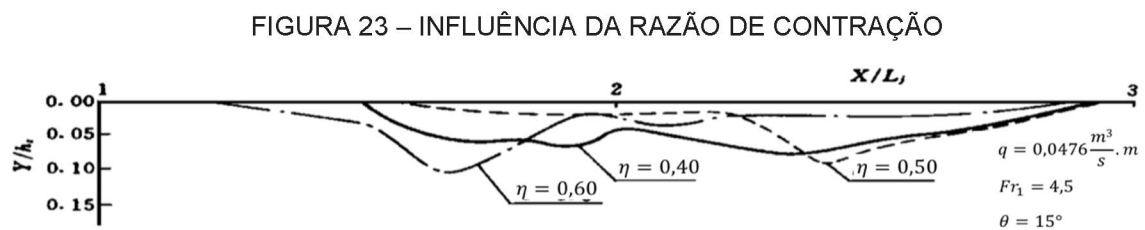
$\Delta E_{total}$  – Parcela de energia dissipada total (m).

A montante do ressalto hidráulico a taxa de energia dissipada pelo vertedouro convencional foi de 44%, enquanto que pelo vertedouro com *flaring piers* foi de 69%.

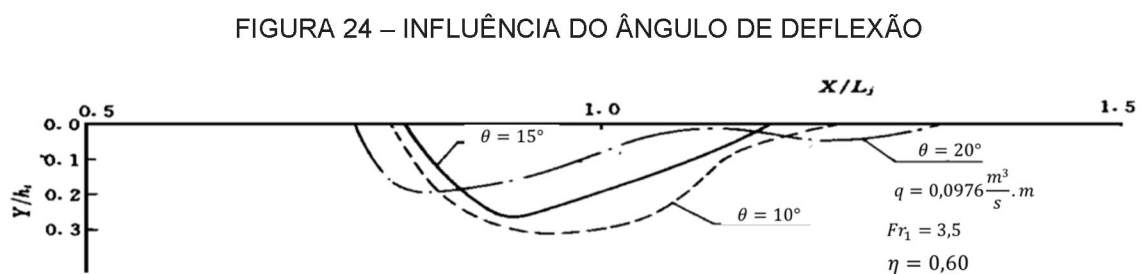


Na seção de jusante do ressalto hidráulico a taxa de energia dissipada pelo vertedouro convencional foi de 56%, enquanto que pelo vertedouro com *flaring piers* foi de 31%. Os autores concluíram que a aplicação dos *flaring piers* diminui o número de Froude no interior da bacia de dissipação, o que explica a menor dissipação de energia neste trecho, quando comparado a vertedouros convencionais.

Os autores avaliaram a influência dos parâmetros geométricos dos *flaring piers* no potencial erosivo do escoamento, através da medição de perfis de erosão formados. A Figura 23 compara as três razões de contração ensaiadas sob o mesmo ângulo de deflexão de 15°. A Figura 24 compara os três ângulos de deflexão ensaiados sob a mesma razão de contração de 60%. Com base nesses ensaios, os autores concluíram que as menores profundidades de erosão foram obtidas com pilares cujas razões de contração foram de 0,40 e 0,50 e ângulos de deflexão de 15 e 20°.



FONTE: adaptado de Li et al. (2000).



FONTE: adaptado de Li et al. (2000).

Li et al (2000) também apresentaram uma equação empírica que relaciona as profundidades conjugadas de jusante de pilares convencionais ( $y_2$ ) e dotados de *flaring piers* ( $y_2'$ ), a seguir.

$$\frac{y_2}{y_2'} = 0,7 + (0,19 + 0,04 \cdot Fr_1) \cdot \eta \quad (30)$$

Onde:

$y_2'$ - profundidade conjugada de jusante de escoamento proveniente de vertedouro dotado de *flaring piers* (m).

Segundo os autores, a profundidade conjugada de jusante é de 10 a 15% menor com a aplicação dos *flaring piers*, quando comparados aos pilares convencionais.

Os autores confrontaram os resultados dos ensaios do modelo com os resultados obtidos através da Equação 30, apresentados na Tabela 5.

TABELA 5 – COMPARAÇÃO DA ENERGIA DISSIPADA - LI ET AL. (2000)

$\eta$	$\Theta$	P/H	$[y_2/y_2']_M$	$[y_2/y_2']_C$	Diferença (%)
0,40	15°	2,14	0,85	0,85	0
0,50	15°	2,16	0,90	0,88	-1,9
0,60	15°	2,16	0,91	0,92	1,1
0,60	10°	2,15	0,92	0,92	0
0,60	20°	2,18	0,91	0,92	1,1
0,40	15°	2,15	0,85	0,85	0
0,50	15°	1,32	0,85	0,865	1,8
0,50	15°	1,32	0,85	0,864	1,7
0,60	15°	1,40	0,90	0,898	-0,2
0,60	10°	1,39	0,92	0,90	-2,2
0,60	20°	1,39	0,91	0,90	-1,4
0,40	15°	1,39	0,85	0,832	-2,1

FONTE: Li et al. (2000).

Onde:

P – altura do vertedouro (m);

$H_0$  – carga sobre o vertedouro (m);

$[y_2/y_2']_M$ - relação entre as profundidades de jusante de um escoamento efluente de um vertedouro convencional e um vertedouro com *flaring piers* medida em modelo (m);

$[y_2/y_2']_C$ - relação entre as profundidades de jusante de um escoamento efluente de um vertedouro convencional e um vertedouro com *flaring piers* calculada pela Equação 30 (m).

Li et al. (2000) também propuseram equações empíricas para determinação do comprimento do ressalto hidráulico proveniente de vertedouros com pilares convencionais (Equação 31) e dotados de *flaring piers* (Equação 32).

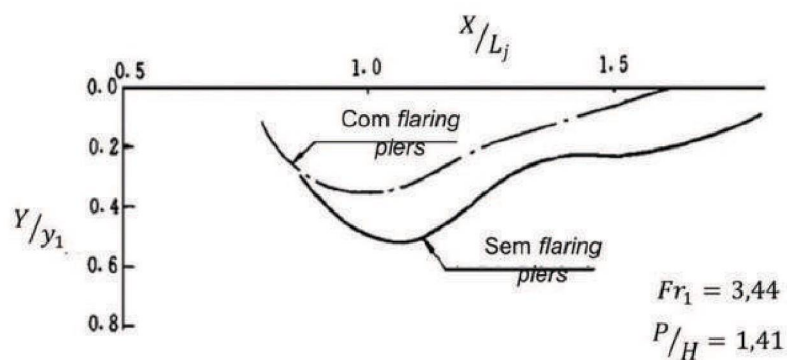
$$\frac{L_j}{y_1} = 9,4 \cdot (Fr_1 - 1) \quad (31)$$

$$\frac{L'_j}{y_1} = 7,3 \cdot (Fr_1 - 1) \quad (32)$$

A Figura 25 apresenta o resultado do ensaio de erosão realizado em modelo hidráulico reduzido para um escoamento cujo número de Froude de montante ( $Fr_1$ ) é 3,44 e a relação entre a altura do vertedouro e a carga hidráulica ( $P/H$ ) é 1,41.

Li et al. (2000) concluíram que a profundidade de erosão formada a partir de um escoamento por vertedouro provido de *flaring piers* é 60% menor do que por um vertedouro convencional, e o volume de material erodido é 50% menor.

FIGURA 25 – PROFUNDIDADES DE EROSÃO OBTIDAS POR LI ET AL. (2000)



FONTE: adaptado de Li et al. (2000).

#### 2.3.4.3 Aplicação dos *flaring piers* em aproveitamentos com baixo número de Froude

Li (2002) estudou a aplicação dos *flaring piers* para aproveitamentos cujo número de Froude são baixos, considerando que esta situação combinada com a ocorrência de altas vazões requer grandes estruturas de dissipação de energia. O autor cita como exemplo dessa característica as usinas hidrelétricas de Yantan e de Mengzhou, cujos números de Froude para a vazão de dimensionamento são 4,5 e 2,5, respectivamente.

O autor fez seu estudo baseado na usina hidrelétrica de Yantan, que possui em sua concepção defletor submerso e bacia de dissipação, por meio de dados de modelo hidráulico reduzido que simulou o comportamento do escoamento através de vertedouro com pilares convencionais e com *flaring piers*. Dos resultados do modelo concluiu-se que o nível de água na bacia de dissipação é de 27% a 43% maior na alternativa com a presença dos *flaring piers*, situação em que é clara a formação do ressalto hidráulico tridimensional. Ainda, a velocidade do fluxo no fundo da bacia do escoamento efluente dos *flaring piers* reduziu rapidamente de 30 m/s para 13 m/s, e a profundidade de erosão a jusante do defletor submerso reduziu de 59,6% para 43%. Por fim, a média de tempo da pressão hidrodinâmica sobre a bacia e sobre o defletor é maior na alternativa com pilares alargados, assim como a raiz quadrada da flutuação de pressão, o que contribui para reduzir a cavitação nas estruturas hidráulicas.

#### 2.3.4.4 Influência dos *flaring piers* associados a vertedouros de barragens em arco na capacidade de descarga

Li et al. (2003) estudaram a influência dos *flaring piers* na capacidade de descarga de um vertedouro associado a uma barragem em arco, através de ensaios em modelo hidráulico reduzido em escala 1:100 da usina de Xiluodu. Os autores basearam-se nos parâmetros geométricos de vertedouros com *flaring piers* de aproveitamentos existentes (Panjiakou, Ankang, Yantan, Wuqiangxi, Geheyan e Yang Jia Wai Zi), para a definição das alternativas a serem ensaiadas.

Li et al. (2003) apresentam as Equações 33 e 34 para determinação do início do alargamento dos pilares ao longo da ogiva do vertedouro, sob o eixo horizontal e vertical, respectivamente.



$$\varepsilon_x = \frac{x}{H_d} \quad (33)$$

Onde:

$\varepsilon_x$  – parâmetro horizontal de início do alargamento dos *flaring piers* (m);

x - distância horizontal da crista da ogiva ao início do alargamento (m);

$H_d$ - carga de projeto do vertedouro (m).

$$\varepsilon_y = \frac{y}{H_d} \quad (34)$$

Onde:

$\varepsilon_y$  – parâmetro vertical de início do alargamento dos *flaring piers* (m);

y - distância vertical da crista da ogiva ao início do alargamento (m).

A Tabela 6 apresenta as alternativas estudadas por Li et al. (2003), e os resultados obtidos.

TABELA 6 – PARÂMETROS GEOMÉTRICOS ESTUDADOS POR LI ET AL. (2003)

Alternativa	Largura original da calha - $B_c$ (m)	Ângulo de Deflexão ( $\theta$ )	Largura da seção mais contraída - b (m)	Razão de contração ( $\eta$ )	Posição de início de alargamento	
					$\xi_x$	$\xi_y$
A	12,50	30°	3,75	0,30	1,17	0,52
			5,00	0,40	1,30	0,62
			6,25	0,50	1,43	0,66
			12,50	1,00	-	-
B	12,50	20°	3,75	0,30	1,17	0,37
			5,00	0,40	1,30	0,42
			6,25	0,50	1,43	0,46
			12,50	1,00	-	-

FONTE: Li et al. (2003).

Li et al. (2003) concluíram que para o cálculo do coeficiente de descarga de vertedouros com *flaring piers* pode-se utilizar a equação de descarga de vertedouros convencionais. Os autores também ressaltam a importância do correto dimensionamento da razão de contração dos pilares, para que não ocorra o controle do escoamento, e a consequente redução da capacidade do vertedouro.

#### 2.3.4.5 Estabilidade da laje de bacias de dissipação

Yan, Hu e Chen (2005) estudaram a estabilidade da laje de fundo de bacias de dissipação devido à ação de jatos de água provenientes de pilares alargados, através de um modelo experimental baseado na usina de Baise. Foram observados o padrão do escoamento, a distribuição da pressão hidrodinâmica na bacia, os processos e mecanismos da perda de estabilidade da laje de fundo, e foi deduzida a relação entre a espessura da laje e o correspondente nível de jusante do escoamento, conforme mostra a Equação 35.

$$h_B \geq \frac{K_1 \cdot H_T^{1,5} \cdot H^{0,5}}{\frac{\gamma_b \cdot e}{\gamma}} \quad (35)$$

Onde:

$h_B$  – profundidade da água na bacia (m);

$K_1$  – coeficiente empírico (adimensional);

$H_T$  – nível de água a montante do vertedouro (m);

$H$  – carga hidráulica do vertedouro (m);

$\gamma_b$  - peso específico do material da bacia ( $\text{N/m}^3$ );

$\gamma$  - peso específico da água ( $\text{N/m}^3$ );

$e$  - espessura da laje da bacia (m).

Yan, Hu e Chen (2005) concluíram que o tempo da solicitação hidrodinâmica sobre a laje de fundo de uma bacia de dissipação é um fator determinante na perda de sua estabilidade. Diferentemente de um maciço rochoso, a placa de fundo de uma bacia de dissipação perde sua estabilidade, num primeiro momento, não no local de impacto do jato, mas em posição mais a jusante, onde ocorrem as máximas forças de elevação. Após experimentos, os autores chegaram a valores de espessura de laje coerentes com a expressão por eles deduzida. A pressão pulsante máxima apareceu na área de impacto do jato, e a raiz quadrada de seu valor médio correspondeu cerca de 10% a 20% da média de tempo da pressão hidrodinâmica.

#### 2.3.4.6 Posição de início do alargamento dos pilares em relação à ogiva

Mo et al. (2007) propuseram uma relação teórica entre o número de Froude na seção logo a montante dos *flaring piers*, a posição dos *flaring piers* e a carga hidráulica do vertedouro. Os autores ressaltam a importância da localização do início do alargamento dos pilares pois quando este for muito perto da crista do vertedouro pode ocorrer controle do escoamento, reduzindo a capacidade de descarga do vertedouro. Por outro lado, quanto mais a jusante estiver localizada essa contração, o escoamento pode apresentar insuficiente contração lateral e expansão longitudinal, o que diminui a dissipação de energia. Os autores realizaram simulações numéricas com dados obtidos das usinas de Wuqiangxi, Yantan, Ankang, Suofengying, Baise, Dachashan, Gaobazhou, Taolinkou, Bajiankou e Shuidong.

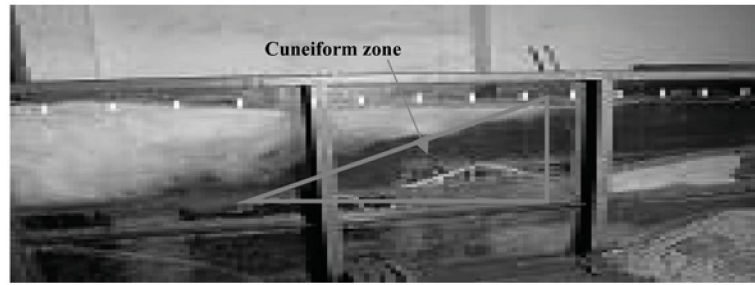
Da observação dos resultados dos protótipos, Mo et al. (2007) encontraram números de Froude logo a montante do alargamento dos pilares com valores entre 1,7 e 2,3. A partir desse parâmetro, e com os dados da vazão específica na seção original, a carga de projeto e a carga de operação, os autores chegaram numa equação que permite estimar o valor de “M” (Figura 8), que corresponde ao ponto de início de alargamento dos pilares do vertedouro.

#### 2.3.4.7 Comprimento do ressalto hidráulico

Chen, Wang e Han (2009) fizeram um estudo em modelo hidráulico reduzido de um vertedouro de superfície com *flaring piers* com bacia de dissipação e descarregador de fundo que teve como objetivo medir o comprimento do ressalto hidráulico. O estudo consistiu na realização de 5 ensaios, cujos números de Froude foram entre 6,34 e 11,20. A cada ensaio foi medido o comprimento do ressalto hidráulico.

Em relação ao comportamento do escoamento, os autores observaram a formação de uma zona cuneiforme e não aerada a montante do *end-sill* da bacia de dissipação, conforme mostra a Figura 26.

FIGURA 26 – ZONA CUNEIFORME A MONTANTE DO END-SILL



FONTE: Chen, Wang e Han (2009).

O ressalto hidráulico formado a partir dos *flaring piers*, conforme observação dos autores, choca-se com o jato de água lançado a partir do descarregador de fundo, o que torna o fluxo sobre a bacia ainda mais turbulento e aerado.

Com base na observação dos ensaios, os autores propuseram duas expressões para o cálculo do comprimento do ressalto hidráulico formado a jusante de vertedouros providos de *flaring piers*, uma considerando somente a profundidade de jusante (Equação 36), e outra considerando as conjugadas (Equação 37).

$$L'_j = 2,93y_2 \quad (36)$$

$$L'_j = 3,33(y_2 - y_1) \quad (37)$$

Comparando-se a Equação 37 (CHEN, WANG e HAN, 2009) com a Equação 19 (ELEVOTORSKI, 1959), os autores indicam que os *flaring piers* propiciam a redução de aproximadamente 48% no comprimento do ressalto hidráulico. Chen, Wang e Han (2009) também calcularam coeficientes de dissipação de energia, que resultaram entre 59 e 76%, conforme mostra a Tabela 7.

TABELA 7 – TAXA DE DISSIPACÃO DE ENERGIA ENSAIADA POR CHEN ET AL. (2009)

Programa	Fr <sub>1</sub>	L <sub>j</sub> <sup>*</sup>	L <sub>j</sub> <sup>'</sup>	K <sub>j</sub> (%)
A	6,34	183,00	88,00	58,5
B	6,61	163,00	78,00	60,0
C	7,20	162,00	81,00	63,0
D	7,02	155,00	72,00	62,0
E	11,20	101,00	58,00	75,5

FONTE: Chen, Wang e Han (2009).

Onde:

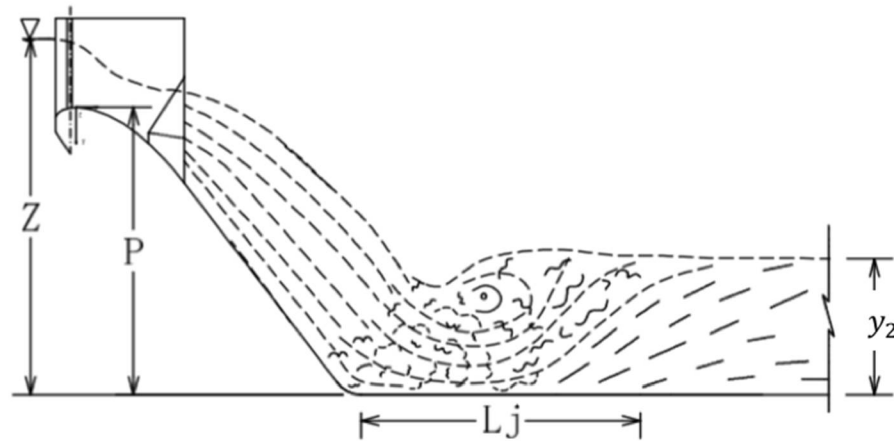


$L_j^*$  – comprimento do ressalto calculado pela equação de Elevatorski (m);  
 $L_j'$  - comprimento do ressalto observado por Chen et al. (2009) (m);  
 $K_j$  - coeficiente de dissipação de energia (%).

#### 2.3.4.8 Comprimento adimensional do ressalto hidráulico

Yin, Liang e Gong (2010) desenvolveram fórmulas empíricas para a definição do comprimento do ressalto hidráulico 3D baseados em estudos em modelo hidráulico reduzido. Foram definidos três parâmetros adimensionais inerentes ao ressalto hidráulico, os quais são a taxa do fluxo de energia ( $K_2$ ), o comprimento ( $L_t$ ) e a profundidade conjugada de jusante ( $y_t$ ) do ressalto hidráulico. Os parâmetros são ilustrados na Figura 27, e as relações entre eles estão indicados nas expressões 38, 39 e 40.

FIGURA 27 – PARÂMETROS UTILIZADOS POR YIN, LIANG E GONG (2010)



FONTE: adaptado de Yin, Liang e Gong (2010).

$$K_2 = \frac{q}{\sqrt{g} \cdot Z^{1,5}} \quad (38)$$

$$L_t = \frac{L_j}{P} \quad (39)$$

$$y_t = \frac{4y_2}{P} \quad (40)$$

Onde:

$K_2$  – taxa de fluxo de energia (adimensional);

- $q$  – vazão específica do vertedouro ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ );  
 $g$  – aceleração da gravidade ( $\text{m}/\text{s}^2$ );  
 $Z$  – Soma da altura do vertedouro com a carga hidráulica (m);  
 $P$  – Altura do vertedouro (m);  
 $L_t$  – Comprimento adimensional do ressalto hidráulico (adimensional);  
 $L_j$  – Comprimento do ressalto hidráulico (m);  
 $y_t$  – Profundidade conjugada de jusante adimensional do ressalto hidráulico (adimensional);  
 $y_2$  – Profundidade conjugada de jusante do ressalto hidráulico (m).

Com bases em ensaios em modelo hidráulico reduzido, os autores chegaram a duas expressões para determinação do comprimento do ressalto hidráulico, sendo uma para ressaltos formados a jusante de vertedouros convencionais (Equação 41), e a outra, para vertedouros com *flaring piers* (Equação 42).

$$L_j = 44,02K + 0,16 \quad (41)$$

$$L'_j = 17,51K + 0,34 \quad (42)$$

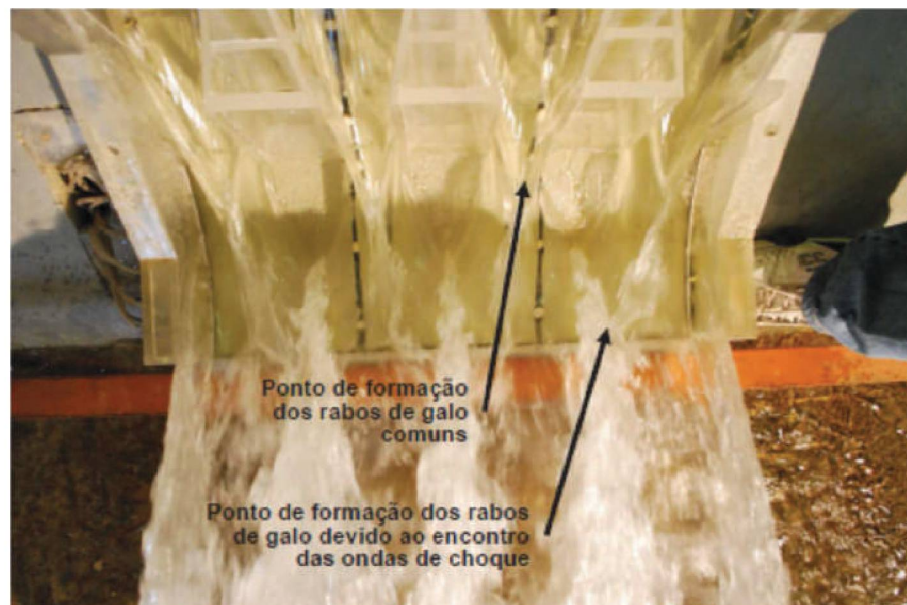
Yin, Liang e Gong (2010) concluíram que para valores elevados de vazão específica, a profundidade conjugada de jusante do ressalto hidráulico proveniente do escoamento de vertedouros dotados de *flaring piers* é praticamente igual à do ressalto hidráulico resultante do escoamento por um vertedouro convencional. Entretanto, o efeito de aeração e a dispersão longitudinal causados pelos *flaring piers* reduzem cerca de 50% o comprimento do ressalto hidráulico, quando comparado ao escoamento proveniente de um vertedouro convencional.

#### 2.3.4.9 Processo erosivo formado por um vertedouro tipo salto de esquí

Lara (2011) desenvolveu um estudo em modelo hidráulico reduzido que consistiu na avaliação da redução da erosão formada a jusante de um vertedouro do tipo salto de esquí associado aos *flaring piers*. Para tanto, foram simuladas duas alternativas de pilares alargados, sendo a primeira com  $\eta = 0,70$  e  $\theta = 15^\circ$  e a segunda com  $\eta = 0,50$  e  $\theta = 19^\circ$ , ambos com geometria retangular, e comparou os resultados com os de um vertedouro com pilares convencionais.

Lara (2011) descreveu o comportamento do jato efluente de pilares alargados, dividindo-o em três trechos. No primeiro, o jato efluente se inicia logo a jusante da deflexão dos muros, ainda dentro da estrutura, e a seção transversal do escoamento tem formato tipo “U”. As profundidades do fluxo nas regiões adjacentes aos muros se elevam, enquanto as ondas de choque se propagam em direção ao eixo do defletor até se encontrarem num ponto nesse eixo (vértice). No segundo, a partir do vértice formam-se dois rabos de galo, um superior, intermitente e instável, e um inferior, estável, de seção transversal esbelta, mas com amplitude longitudinal crescente ao longo do jato até a região de impacto. Esse trecho termina no ponto de contração máxima (em planta) do jato efluente. E no terceiro, a partir do ponto de contração máxima, o jato assume um perfil vertical espesso e com comportamento instável, ocasionando borrifos de grande amplitude, muitas vezes chocando-se com os jatos dos vãos adjacentes. A Figura 28 e a Figura 29 ilustram os trechos descritos pelo autor na caracterização do jato proveniente de *flaring piers*.

FIGURA 28 – CARACTERÍSTICAS DO JATO EFLUENTE DE FLARING PIERS



FONTE: Lara (2011).



FIGURA 29 – ASPECTO LONGITUDINAL DO JATO DE FLARING PIERS



FONTE: Lara (2011).

Em relação ao volume de material erodido, Lara (2011) concluiu que a alternativa cuja razão de contração é de 0,70 e o ângulo de deflexão é de  $15^\circ$  resultou em redução de 52%, enquanto que a alternativa cuja razão de contração é de 0,50 e o ângulo de deflexão é de  $19^\circ$  resultou em redução de 67%, ambas em relação à alternativa de pilares convencionais.

Lara (2011) também avaliou a redução da profundidade máxima da fossa de erosão dos *flaring piers*, comparados à alternativa de pilares convencionais, na qual a alternativa cuja razão de contração é de 0,70 e o ângulo de deflexão é de  $15^\circ$  resultou em redução de 37%, enquanto que a alternativa cuja razão de contração é de 0,50 e o ângulo de deflexão é de  $19^\circ$  resultou em redução de 44%.

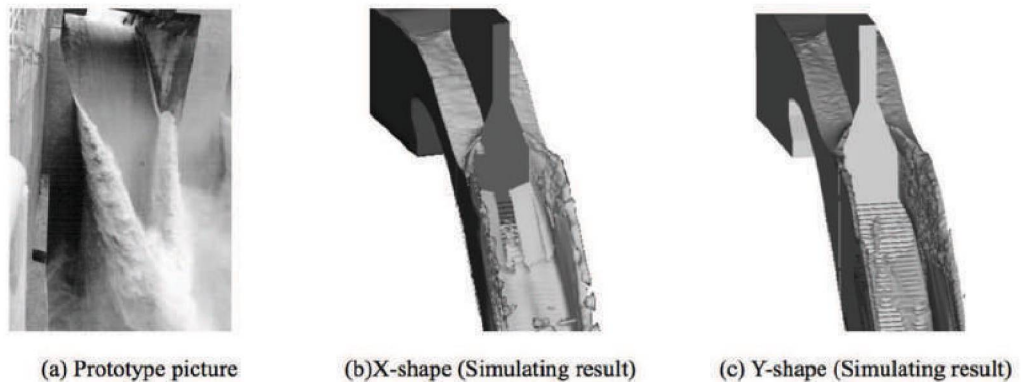
#### 2.3.4.10 Comparação entre as geometrias do tipo Y e X

Zhang, Wu e Zheng (2011) realizaram um estudo em modelo numérico para comparar as geometrias do tipo X e Y dos *flaring piers* associado a um vertedouro em degraus. Os resultados foram comparados com dados da usina de Suofengying. Segundo os autores, o pilar com geometria do tipo X propicia maior área para passagem do escoamento na região próxima à ogiva. Os autores afirmam que o pilar com geometria em X possui vantagens em relação ao pilar com geometria em Y, pois causam menor influência na capacidade de descarga do vertedouro e propicia



distribuição da pressão sobre a ogiva de maneira mais uniforme. A Figura 30 apresenta um vertimento ocorrendo no vertedouro da usina de Suofengying (a) e a simulação realizada pelos autores considerando pilares em X (b) e em Y (c).

FIGURA 30 – VERTIMENTO E SIMULAÇÕES NA USINA DE SUOFENGYING



FONTE: Zhang, Wu e Zheng (2011).

#### 2.3.4.11 Profundidade conjugada de jusante e *flaring piers* do tipo X

Dai et al. (2015) apresentaram um método para definir a profundidade conjugada de jusante necessária considerando a aplicação dos *flaring piers* de seção em X. Os autores basearam-se no teorema da conservação da quantidade de movimento e na abordagem da divisão do escoamento em duas parcelas, uma que escoia junto à ogiva do vertedouro, e outra que é lançada após a contração causada pelos pilares alargados.

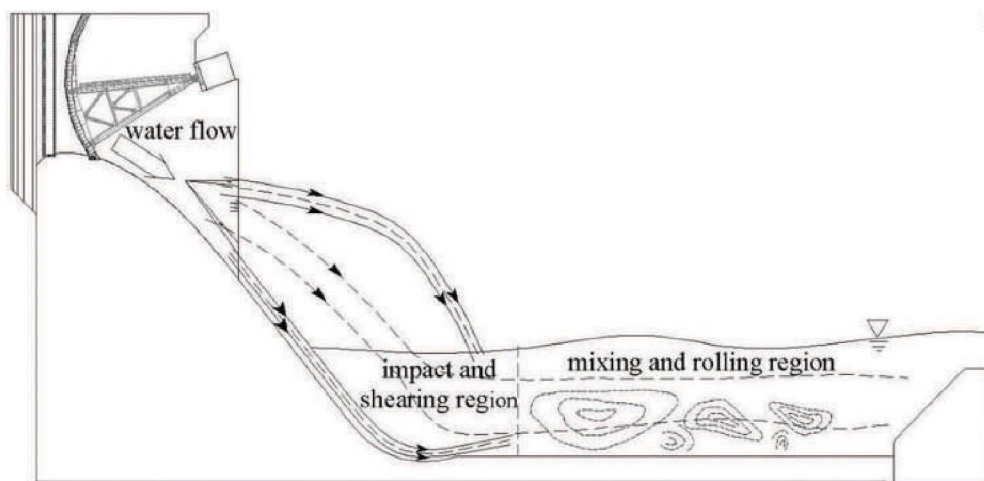
Para calibrar o modelo numérico, Dai et al. (2015) utilizaram os dados da usina de Suofengying. Os autores apresentam um roteiro de cálculo para cálculo da profundidade de jusante do ressalto hidráulico e comparam os resultados com dados das usinas de Suofengying e Shatuo. Apesar de os autores alegarem que o método chega a resultados muito próximos aos de protótipo, apresentando diferenças máximas na ordem de 5%, o estudo não aborda a comparação do resultado com outras geometrias de *flaring piers*, ou com os pilares convencionais.

#### 2.3.4.12 *Flaring piers* do tipo X associados a bacias defletoras

Wei (2013) estudou em modelo físico da usina de Gung Nong a associação dos pilares alargados com geometria tipo X com bacia defletora, com o objetivo de

analisar a média de tempo da pressão de impacto, as velocidades próximas ao fundo da bacia e as flutuações de pressão. Para tanto, o autor dividiu o escoamento em duas parcelas, sendo uma lançada após a contração dos *flaring piers*, e outra adjacente à ogiva do vertedouro. O padrão do escoamento é ilustrado na Figura 31.

FIGURA 31 – PADRÃO DE ESCOAMENTO DE FLARING PIERS EM X



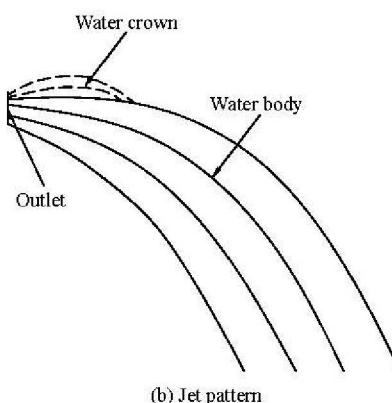
FONTE: Wei (2013).

Segundo Wei (2013), na região da bacia defletora as linhas de corrente da parcela do fluxo que escoam junto à ogiva do vertedouro são direcionadas relativamente para cima e chocam-se com a parcela de fluxo lançada pelos pilares alargados, o que faz aumentar a dissipação de energia. O autor verificou que a bacia defletora é a região que recebe a maior pressão de impacto, e esta decai quanto maior a vazão aplicada. Além disso, para grandes vazões, a velocidade junto ao fundo da bacia decresce rapidamente. O autor concluiu que a combinação dos *flaring piers* com geometria tipo X com bacias defletoras são uma boa alternativa para estruturas de descarga, e propiciam boas referências no projeto de dissipadores de energia na engenharia hidráulica.

#### 2.3.4.13 *Flaring piers* associados a barragens em arco

Li et al. (2012) estudaram a aplicação dos *flaring piers* em uma barragem em arco de grande altura por meio de testes experimentais e teóricos. Os parâmetros hidráulicos abordados pelos autores foram a profundidade do escoamento, sua velocidade média e o número de Froude. O objetivo do estudo foi estimar a trajetória





FONTE: Li et al (2012).

Considerando que a premissa da aplicação dos *flaring piers* é não alterar a capacidade de descarga do vertedouro, os autores variaram os parâmetros geométricos dos pilares e da inclinação do vertedouro para obter uma relação entre a capacidade de descarga e a carga hidráulica do vertedouro. Foram utilizadas as razões de contração de 0,316, 0,40, 0,50 e 1,00, e ângulos de deflexão de 7,6°, 11,3° e 15,0°. Também foi variado o ângulo do paramento do vertedouro (20°, 30°, 35° e 40°). Concluiu-se que a variação desses parâmetros produz pouco efeito na capacidade de descarga do vertedouro de superfície quando o escoamento é supercrítico. Porém, quando o escoamento se torna subcrítico, a capacidade de descarga reduz-se significativamente.

Em relação à distribuição de pressão ao longo da ogiva do vertedouro, os autores observaram que, no início do escoamento, naturalmente a linha de fluxo encurva-se na crista do vertedouro. Em seguida, a linha de fluxo continua a ondular rapidamente devido às ondas de choque e ao estreitamento. A pressão medida na superfície do vertedouro corresponde à soma da pressão hidrostática e da pressão centrífuga causada pela curvatura da calha. Na crista do vertedouro, a pressão centrífuga está na direção oposta à pressão hidrostática, e a pressão total é reduzida. O valor mínimo da pressão total é atingido logo a jusante da crista do vertedouro, e diminui com o aumento da carga hidráulica. Ao longo do escoamento, a direção da curvatura das linhas de corrente muda gradativamente, até que a pressão centrífuga seja a mesma que a pressão hidrostática. Assim, a pressão total aumenta e atinge seu máximo próximo à saída dos *flaring piers*, diminuindo rapidamente quando o jato atinge o ar.



Para o desenvolvimento do método, Li et al. (2012) dividiram o processo do escoamento em três etapas, sendo a primeira referente ao escoamento junto à superfície do vertedouro antes de encontrar a seção contraída, a segunda durante a seção contraída dos *flaring piers* e a terceira o jato livre caindo no ar.

#### 2.3.4.14 Estudos relacionados à cavitação de vertedouros em degraus

Hou, Yang e Zheng (2014) realizaram uma simulação numérica para avaliar as pressões negativas e a consequente cavitação em vertedouros em degraus combinados com *flaring piers* simétricos e com geometria em Y. Para tanto, os autores ensaiaram os parâmetros geométricos mostrados na Tabela 8.

TABELA 8 – FLARING PIERS SIMÉTRICOS ENSAIADOS POR HOU, YANG E ZHENG (2014)

Programa	$\eta$	$\theta$	Geometria
A	0,700	19,98°	Y – Simétrico
B	0,445	19,98°	Y – Simétrico
C	0,400	19,03°	Y - Simétrico

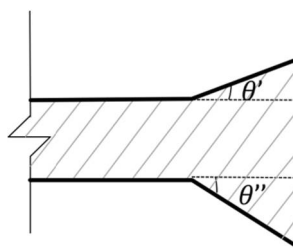
FONTE: Hou, Yang e Zheng (2014).

As simulações realizadas pelos autores mostraram que o comprimento das cavidades formadas decorrente do fenômeno de cavitação nos degraus do vertedouro aumenta à medida que a razão de contração dos *flaring piers* assimétricos decresce. O programa de ensaios B apresentou comprimentos de cavidades 1,4% menores em relação ao programa A, enquanto que o programa C apresentou redução de 28,9%, também em relação ao ensaio A. Hou, Yang e Zheng (2014) concluíram que a máxima pressão negativa decresce quanto menor a razão de contração, mas ocorre uma gama mais extensa de pressão negativa sobre os degraus.

Em continuidade a esse tema, Hou, Yang e Zheng (2014) realizaram uma simulação numérica para avaliar as pressões negativas e a consequente cavitação em vertedouro em degraus combinados com *flaring piers* assimétricos e com geometria em Y.

A assimetria dos pilares ocorre na implantação de diferentes ângulos de deflexão nos pilares ( $\theta'$  e  $\theta''$ ), conforme esquema indicado na Figura 34.

FIGURA 34 – ESQUEMA DE PILAR ASSIMÉTRICO



A Tabela 9 mostra os parâmetros ensaiados por Hou, Yang e Zheng (2014).

TABELA 9 – FLARING PIERS ASSIMÉTRICOS ENSAIADOS POR HOU, YANG E ZHENG (2014)

Programa	$\eta$	Ângulo de deflexão esquerdo – $\theta'$	Ângulo de deflexão direito – $\theta''$	Geometria
A	0,598	19,98°	7,00°	Y – Assimétrico
B	0,497	19,98°	13,80°	Y – Assimétrico
C	0,445	19,03°	17,07°	Y - Assimétrico

FONTE: Hou, Yang e Zheng (2014).

As simulações realizadas pelos autores mostraram que o comprimento das cavidades formadas decorrente do fenômeno de cavitação nos degraus do vertedouro aumenta à medida que a razão de contração dos *flaring piers* assimétricos decresce. Hou, Yang e Zheng (2014) também concluíram que os comprimentos da cavitação foram de 4 a 5 vezes maiores do lado em que o ângulo de deflexão é menor. O programa de ensaio B apresentou redução de 53,7% nos comprimentos das cavidades formadas, e o programa C apresentou redução de 44,5%, ambas em relação ao programa A.

#### 2.3.4.15 Pressões sobre bacias de dissipação

Chen e Zhang (2015) estudaram as pressões sobre a bacia de dissipação causadas por um ressalto formado após a contração do escoamento pelos *flaring piers* em modelo hidráulico reduzido. Os autores avaliaram os efeitos da pressão de impacto a jusante de um vertedor de superfície em um modelo que abrangeu quatro razões de contração (0,2, 0,4, 0,6 e 0,8) e quatro ângulos de deflexão (15°, 20°, 25° e 30°).

Chen e Zhang (2015) observaram que quando a razão de contração é de 0,80, não ocorre suficiente contração lateral do jato, e sua extensão longitudinal não é satisfatória. As razões de contração de 0,60 e 0,40 causam boa dispersão longitudinal do jato e causam fortes flutuações de pressão sobre a bacia de dissipação. As razões de contração de 0,40 e 0,20, quando combinadas com ângulos de deflexão de 25° e 30° levam à formação de um ressalto estável. Os autores também relatam que quanto menor a razão de contração, o pico da pressão hidrodinâmica ocorre mais a jusante, e com o aumento do ângulo de deflexão de 15° para 25°, o pico da pressão de impacto sobre a bacia de dissipação decresce, mas quando o ângulo de deflexão é de 30° esse decréscimo não é evidente.

Chen e Zhang (2015) concluíram que os parâmetros ideais a serem adotados para os *flaring piers* são os ângulos de contração de 25° e 30° e os raios de contração de 0,4 e 0,6.

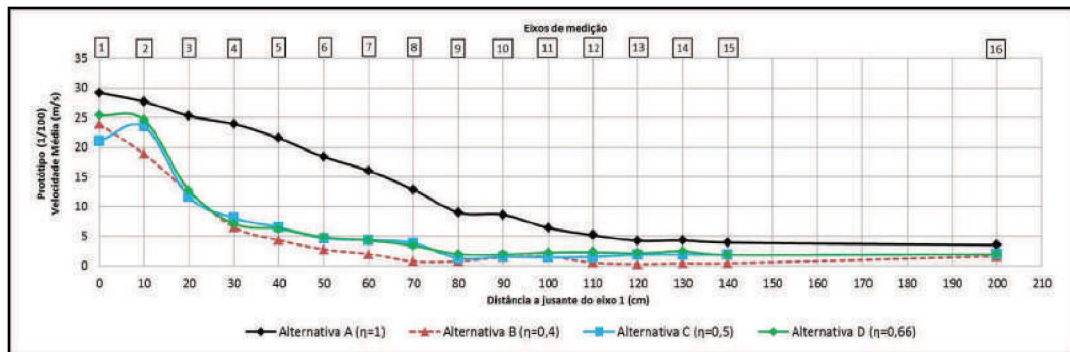
#### 2.3.4.16 Velocidades a jusante dos *flaring piers*

Cruz (2016) avaliou a eficiência dos pilares de seção variável em modelo hidráulico reduzido através de medições de velocidades a jusante de uma estrutura de descarga, em uma transição de escoamento supercrítico para o subcrítico, com a devida formação do ressalto hidráulico.

A autora comparou quatro alternativas, sendo uma correspondente ao pilar convencional (Alternativa A), e as outras três correspondentes a pilar de seção variável com ângulo de deflexão de 20° e razões de contração de 0,4 (Alternativa B), 0,50 (Alternativa C) e 0,66 (Alternativa D).

A partir de medições realizadas junto ao fundo do canal, Cruz (2016) concluiu que o escoamento proveniente das alternativas providas de *flaring piers* apresentaram menores velocidades, conforme ilustrado no gráfico da Figura 35, que representa a velocidade do escoamento na ordenada e a distância após a estrutura de descarga a jusante na abcissa. Essa diferença é maior no trecho inicial do escoamento, onde ocorre a formação do ressalto hidráulico. Na região em que o escoamento retornou à condição de uniformidade, as velocidades resultantes das 4 alternativas são praticamente as mesmas.

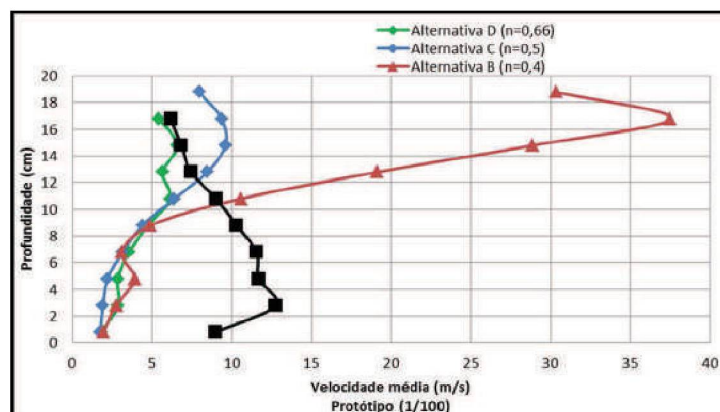
FIGURA 35 – VELOCIDADES JUNTO AO FUNDO DO CANAL



FONTE: Cruz (2016).

Cruz (2016) também realizou medições de velocidade em um perfil vertical correspondente ao término do ressalto hidráulico, correspondente ao Eixo 9 da Figura 35. Conforme ilustrado no gráfico da Figura 36, que mostra um perfil vertical de velocidades, os pilares com razão de contração de 0,40 apresentaram altas velocidades junto à superfície do escoamento.

FIGURA 36 –VELOCIDADES APÓS O TÉRMINO DO RESSALTO HIDRÁULICO

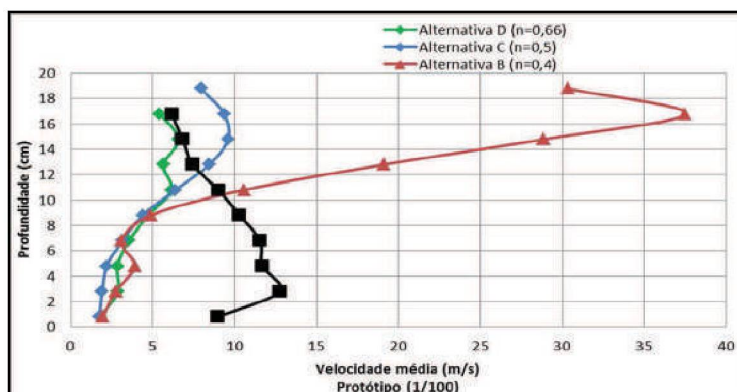


FONTE: Cruz (2016).

Por fim, Cruz (2015) realizou medições de velocidade em um perfil vertical suficientemente a jusante (após o Eixo 15 da Figura 35), correspondente a um trecho em que o escoamento já havia retomado à sua condição de uniformidade. Conforme ilustrado no gráfico da Figura 37, a Alternativa B permaneceu apresentando altas velocidades junto à superfície do escoamento.

FIGURA 37 –VELOCIDADE APÓS O TÉRMINO DO RESSALTO HIDRÁULICO





FONTE: Cruz (2016).

Cruz (2016) concluiu que os pilares de seção variável influenciam diretamente as velocidades do escoamento junto ao fundo do canal experimental, o que pode diminuir eventuais processos erosivos a jusante de barragens. Entretanto, a autora concluiu que a alternativa B ( $\eta = 0,40$ ) induz ao afogamento do ressalto hidráulico, além de apresentar velocidades mais elevadas junto à superfície do escoamento.

Cruz (2016) concluiu que as Alternativas C ( $\eta = 0,50$ ) e D ( $\eta = 0,66$ ) podem ser adequadas em eventuais aplicações práticas dos *flaring piers*.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são descritas a instalação experimental e o método adotado para a realização dos ensaios. Inicialmente, é apresentada a instalação experimental, com sua descrição e dos instrumentos utilizados na pesquisa. Posteriormente, é descrita a metodologia utilizada durante os ensaios.

#### 3.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS

A instalação experimental utilizada na presente pesquisa foi uma estrutura existente no laboratório do Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR). O Apêndice A do presente trabalho apresenta a planta esquemática (Figura 63) e o perfil esquemático (Figura 64) do modelo experimental utilizado na pesquisa. Esta instalação foi a mesma utilizada por Cruz (2016) em seu estudo.

O órgão de descarga foco dessa pesquisa consiste em um bocal com 0,39 m de largura por 0,05 m de altura, produzindo um escoamento supercrítico, cuja energia cinética pretende-se dissipar. O fluxo escoar por um canal retangular de fundo horizontal, com paredes de acrílico, largura útil de 0,39 m, altura de 0,50 m e comprimento total de 6,30 m.

Na saída do órgão de descarga foram acoplados dois pilares, a fim de simular um vão e dois meios vãos de um vertedouro, conforme mostra a Figura 38. O trecho inicial dos pilares é fixo no canal experimental, e a parte dos pilares que possui variação dos parâmetros geométricos é móvel, fixada à estrutura por um parafuso.

FIGURA 38 – PILARES ACOPLADOS NA SAÍDA DO ÓRGÃO DE DESCARGA



Foram produzidas dez alternativas de pilares com diferentes razões de contração e ângulos de deflexão (*flaring piers*), todas com geometria transversal retangular, com o objetivo de avaliar a influência desses parâmetros na formação de processos erosivos a jusante de uma estrutura hidráulica. Os pilares da alternativa A correspondem a um vertedouro convencional, e possuem razão de contração ( $\eta$ ) unitária e ângulo de deflexão ( $\theta$ ) nulo. A Tabela 10 destaca as alternativas ensaiadas. No Apêndice B consta a representação em planta das alternativas com as respectivas dimensões.

TABELA 10 – ALTERNATIVAS ENSAIADAS

Alternativa	Razão de Contração ( $\eta$ )	Ângulo de Deflexão ( $\theta$ )
A	1,00	0°
B	0,40	15°
C	0,40	20°
D	0,40	25°

E	0,50	15°
F	0,50	20°
G	0,50	25°
H	0,66	15°
I	0,66	20°
J	0,66	25°

Devido ao trecho curto entre a alimentação e a estrutura de descarga, para melhorar as condições de aproximação do escoamento, o reservatório possui um dispositivo de tranquilização, composto por canos de PVC justapostos que possuem o objetivo de distribuir o fluxo de forma uniforme a montante da estrutura de descarga.

O sistema de restituição é controlado por uma comporta de regulação manual, capaz de controlar o nível de água de jusante e impor uma das condições do escoamento.

Para a leitura das profundidades do escoamento foram utilizadas duas réguas limnimétricas com escala graduada, uma instalada no reservatório e outra próxima à comporta de regulação do nível de jusante, já no trecho final do canal.

Para a avaliação dos processos erosivos foram realizados ensaios com fundo móvel. Foi inserida ao fundo do canal uma caixa de material solto susceptível à erosão com 0,105 m de profundidade, e 1,10 m de comprimento, iniciando-se logo após o término do orifício, conforme mostrado na Figura 39.

FIGURA 39 – VISTA LATERAL DA CAIXA DE EROSÃO



Para a realização dos ensaios, a caixa de erosão foi preenchida com pedregulho de granulometria uniforme, com dimensões máximas de 7,6 mm, o que

corresponde a blocos de rocha com diâmetros na ordem de 0,76 m em protótipo. O volume da caixa de erosão é 0,04299 m<sup>3</sup>.

As leituras das profundidades da fossa de erosão formada em cada ensaio foram realizadas através de uma régua limnimétrica móvel, ajustada para esse fim, conforme mostrado na Figura 40.

FIGURA 40 – PONTEIRA LIMNIMÉTRICA MÓVEL



Este trabalho enfoca a instalação de contrações imediatamente a montante do ressalto hidráulico. Existem outras formas de uso do dispositivo instalando-se as contrações mais a montante, logo a jusante da crista do vertedouro, como indicado na Figura 7, utilizando-se os pilares onde são fixados os munhões das comportas. O estudo de vertedouros dessa natureza está em andamento no CEHPAR, através do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento 369/2015 – Desenvolvimento de Critérios para Dimensionamento de Bacias de Dissipação de Energia com Uso de Flaring Piers Utilizando Modelo Hidráulico Reduzido, sob a gerência da autora.

### 3.2 MÉTODO

O presente estudo tem como foco o comportamento do ressalto hidráulico formado por pilares de vertedouros com seção variável, com diferentes parâmetros geométricos. O modelo respeitou o critério de semelhança de Froude, conforme apresentado na Tabela 11.

TABELA 11 – FATORES DE ESCALA DO MODELO



Semelhança	Grandeza	Fator de Escala	$\lambda$
Geométrica	Dimensão Linear	$\lambda = l_m/l_p$	100
	Área	$\lambda = \lambda^2$	10.000
	Volume	$\lambda = \lambda^3$	1.000.000
Cinemática	Velocidade	$\lambda = \lambda^{1/2}$	10
	Tempo	$\lambda = \lambda^{1/2}$	10
Dinâmica	Esforço	$\lambda = \lambda^3$	1.000.000
	Pressão	$\lambda = \lambda$	100
	Vazão	$\lambda = \lambda^{5/2}$	100.000
	Vazão Específica	$\lambda = \lambda^{3/2}$	1.000

### 3.2.1 Condições de Contorno

Nesta subseção são apresentados os critérios de seleção da vazão ensaiada e do nível de jusante estabelecido. Essas duas grandezas representam as condições de contorno que foram impostas em todos os ensaios. Com isso, assegurou-se que o comportamento do escoamento, a fossa de erosão formada e as variações do nível de montante fossem comparados a partir das mesmas condições de escoamento, permitindo estabelecer comparações entre as alternativas.

A vazão selecionada para a realização dos ensaios foi de 40,00 l/s. Considerando a largura do vão de descarga do modelo, tem-se a vazão específica corresponde de 0,133 m<sup>3</sup>/s.m, ou 133,33 m<sup>3</sup>/s.m em um protótipo. Este valor encontra-se compatível com o de aproveitamentos hidrelétricos em fase de viabilidade (Tabela 1), e, portanto, foi selecionado, partindo-se da escala geométrica de 1:100, para realização dos ensaios.

Partindo-se do canal com o fundo fixo horizontal em acrílico foram realizados ensaios exploratórios com os pilares convencionais (Alternativa A) acoplados na saída do orifício. A partir do controle da profundidade de jusante do escoamento ( $y_2$ ), buscou-se obter um ressalto hidráulico bem formado, iniciando-se logo a jusante dos pilares, de forma a permitir a observação dos fenômenos hidráulicos durante os ensaios. Essa condição é satisfeita quando a profundidade do escoamento a jusante é de 0,211 m.

O nível de jusante e a vazão estabelecidos foram mantidos nos ensaios de todas as alternativas.

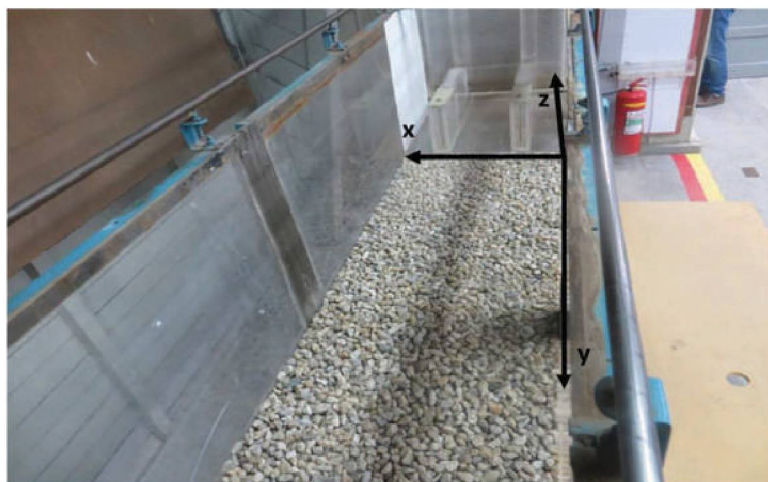
### 3.2.2 Fossa de Erosão

Os ensaios de erosão foram realizados com fundo móvel, considerando a existência de um leito de material erodível a jusante das estruturas, para verificar como se comporta esse material em termos de profundidade da fossa de erosão, formação, localização de barra e volume de material erodido para diferentes alternativas de contração. Esse tipo de ensaio apresenta resultados qualitativos pois não se consegue reproduzir com exatidão a resistência da rocha do leito, mas pode propiciar confrontos entre o desempenho das alternativas pelo fato do teste ser conduzido com o mesmo material móvel.

O material granular foi selecionado a partir de ensaios exploratórios, de forma a permitir a visualização da diferença do resultado da ação do escoamento sobre o leito móvel, conforme cada alternativa ensaiada. Assim, o material ensaiado possui diâmetro máximo de 7,6 mm, o que em protótipo equivale a rochas com diâmetros máximos na ordem de 0,76 m. Ensaios com britas de granulometria menor levaram ao carreamento do material para jusante do canal, enquanto que uma granulometria maior não expressou de forma tão evidente as diferenças entre as fossas de erosão formadas de um ensaio para outro.

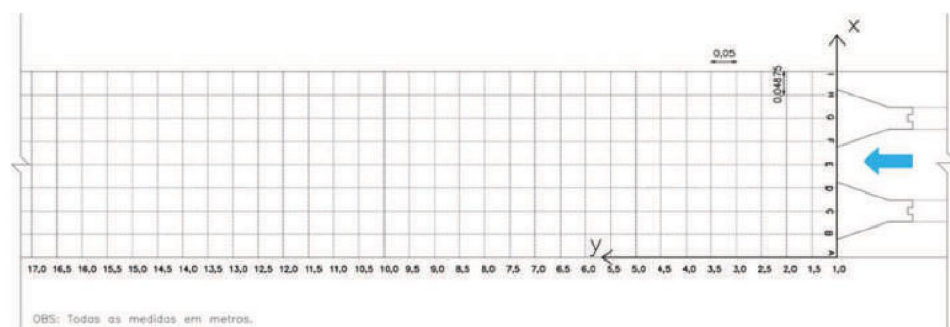
A superfície da fossa de erosão foi caracterizada considerando um sistema tridimensional definido pelas coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$ , no qual o eixo  $x$  representa a direção transversal, o eixo  $y$  representa a direção longitudinal e o eixo  $z$  representa a profundidade do canal, conforme ilustrado na Figura 41.

FIGURA 41 – SISTEMA DE REFERÊNCIA DA FOSSA DE EROSIÃO



Na direção do eixo x foram realizadas medições a cada 0,04875 m e no eixo y foram realizadas medições a cada 0,05 m, conforme ilustra a Figura 42. As letras A a I serviram de referência para o posicionamento em relação ao eixo x, e os números, iniciando no 1,0 e sequencialmente espaçados de 0,5 em 0,5, serviram de referência para o posicionamento em relação ao eixo y. Em cada um dos pontos da malha foi realizada a medição da profundidade da fossa de erosão formada (eixo z), através da régua limnimétrica móvel posicionada sobre o canal (Figura 40).

FIGURA 42 – MALHA NO PLANO XY DA FOSSA DE EROSÃO



Os ensaios de erosão foram realizados em duas etapas, simulando que parte do material erodido é carregado pelo fluxo após determinado tempo. Segundo Bollaert e Schleiss (2003), em ensaios de modelo reduzido com fundo móvel, é usual a remoção progressiva da barra de material formada, a fim de resultar no limite de erosão estático.

Foram duas etapas, a saber: (I) imposição da vazão estabelecida sobre a caixa de erosão completamente preenchida pelo material móvel, e (II) remoção da barra de material formada acima do limite superior da caixa de erosão, e nova imposição da vazão estabelecida.

A Figura 43 ilustra a formação de barra, e então a referência utilizada para a remoção de material correspondente.

FIGURA 43 – INDICAÇÃO DA BARRA FORMADA





Na natureza o carreamento de material depende da geologia local. Todavia, com o intuito de comparar as alternativas, considera-se válido esse procedimento para avaliação da continuidade do processo erosivo.

### 3.2.3 Duração dos ensaios

Após ensaios exploratórios, observou-se que a fossa de erosão, para as condições de contorno estabelecidas, forma-se nos 15 minutos iniciais do ensaio. A partir desse tempo, vagas mudanças foram observadas em relação à localização e altura da barra formada.

Assim, considerando a utilização do mesmo critério de avaliação para a comparação das alternativas ensaiadas, o tempo em que a fossa de erosão ficou exposta com a vazão estabelecida foi de 1 hora.

### 3.2.4 Procedimentos de ensaios

Com o intuito de avaliar a eficiência da utilização de pilares de vertedouros de seção variável para redução de processos erosivos a jusante de estruturas hidráulicas, os ensaios foram realizados em duas etapas. A Etapa I visou simular os processos erosivos causados pela descarga de um vertedouro diretamente sobre o leito, inicialmente intacto. A Etapa II teve o intuito de avaliar a continuidade do processo erosivo após a simulação do carreamento de material pelo escoamento. Os procedimentos são descritos na Tabela 12.



TABELA 12 – DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DOS ENSAIOS

Etapa	Procedimento	Descrição
I	1	Preenchimento completo da caixa de erosão com o material móvel
	2	Acoplamento dos pilares na saída do orifício, conforme a alternativa a ser ensaiada
	3	Imposição da vazão, de forma lenta e sincronizada com o controle da profundidade do escoamento a jusante, a fim de não causar acelerações no escoamento e desconfigurar o material móvel antes do início do ensaio
	4	Fixação do nível de jusante estabelecido, de forma lenta e coordenada com a imposição da vazão, de forma a não ocasionar acelerações do escoamento que pudessem distorcer os resultados
	5	Observação do comportamento hidráulico do escoamento e de seus efeitos sobre o material móvel
	6	Registro dos ensaios através de anotações, fotos e vídeos, sistematicamente a cada 15 minutos, até completar os 60 minutos de ensaio
	7	Aferição dos níveis de água de montante e de jusante
	8	Ao término do ensaio (60 minutos), fechamento do registro do alimentador de vazão, coordenado com o acionamento da comporta de jusante do canal para promover o esvaziamento lento do canal
	9	Medição da superfície da fossa de erosão formada
	10	Registro fotográfico da fossa de erosão
II	11	Remoção da barra de blocos formada acima do nível referente ao topo da caixa de erosão
	12	Medição do volume de material da barra formada
	13	Repetição dos procedimentos 3 a 10

### 3.2.5 Restrições em Modelos Reduzidos

A dificuldade em simular o maciço rochoso adequadamente em laboratório faz com que a maioria dos testes, com concepção do tipo fundo móvel para avaliação de erosão, pressuponham que a rocha já se encontra fraturada. Assim sendo, esses testes levam à formação de uma barra de material a jusante, o que resulta numa subestimação da profundidade total da erosão. Por este motivo, é usual a remoção progressiva da barra de material formada, a fim de resultar no limite de erosão estático (BOLLAERT E SCHLEISS, 2003).

Os efeitos de escala de aeração do jato dependem principalmente da intensidade inicial da turbulência do jato e da contração gravitacional do jato. Por este motivo, a aeração não pode ser reproduzida com precisão em modelos que respeitam a escala geométrica de Froude pois a turbulência interna do fluxo, representada pelo número de Reynolds, é subestimada, enquanto que a tensão superficial, representada pelo número de Weber, é superestimada (HELLER, 2011).

Em relação aos efeitos de escala de tempo, as observações em protótipos indicam alta taxa de erosão no início do fenômeno, alcançando em média noventa e

cinco por cento da profundidade final (BOLLAERT E SCHLEISS, 2003). A formação final da fossa de erosão necessita de tempo significativo. Para fins práticos, o tempo é menos significativo quando se assume que a profundidade de erosão final é completamente gerada durante a descarga de pico do hidrograma de entrada e que a massa de rocha já está fraturada. Entretanto, ao simular o maciço rochoso já fraturado desconsidera-se o processo de erosão progressiva do maciço que ocorre devido aos transientes de pressão que se propagam para as juntas das rochas.

Por fim, como no presente estudo há uma velocidade considerável junto às paredes laterais, pode haver um efeito de escala das paredes, por haver uma resistência adicional ao escoamento no modelo. Entretanto, trata-se de estudo comparativo entre várias alternativas, que estão sujeitas às mesmas condições de contorno. Também cabe ressaltar que o material utilizado no estudo da erosão é gráúdo o suficiente para que não sofra efeitos de viscosidade. Portanto, não houve grandes preocupações quanto à validade do estudo em modelo e os consequentes efeitos de escala aos quais ele está sujeito.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados sobre o escoamento no canal experimental apresentados nesse capítulo são observações gerais sobre o escoamento, comprimento aparente do ressalto hidráulico, caracterização da fossa de erosão e nível de água de montante do escoamento. Espera-se descrever as principais características do escoamento resultante de cada alternativa ensaiada, assim como mensurar e descrever o padrão da fossa de erosão formada a jusante dos pilares de seção variável. Também é avaliada a influência dos pilares no nível de montante do escoamento, com o intuito de avaliar eventuais controles exercidos.

### 4.1 CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO

São apresentados na Tabela 13 os parâmetros utilizados como dado de entrada do modelo, devidamente relacionado a valores de protótipo.

TABELA 13 – DADOS DE ENTRADA DO MODELO

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Modelo	Protótipo
-----------	---------	---------	--------	-----------

Vazão	Q	m <sup>3</sup> /s	0,03983	3983,00
Largura do vertedouro a montante do ressalto hidráulico	B	m	0,30	30,00
Profundidade a montante do ressalto hidráulico	y <sub>1</sub>	m	0,05	5,00
Profundidade a jusante do ressalto hidráulico	y <sub>2</sub>	m	0,211	21,10
Largura do canal	b <sub>c</sub>	m	0,39	39,00

A Tabela 14 apresenta as grandezas calculadas a partir dos dados de entrada. Para esses cálculos, foram adotados os seguintes valores:

$$g=9,81 \text{ m/s}^2;$$

$$\alpha=1,00.$$

TABELA 14 – DADOS CALCULADOS DO MODELO

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Modelo	Protótipo
Vazão específica	q	m <sup>3</sup> /s.m	0,133	133,33
Área do escoamento a montante	A <sub>1</sub>	m <sup>2</sup>	0,015	150,00
Velocidade do escoamento a montante	v <sub>1</sub>	m/s	2,667	26,67
Número de Froude a montante	Fr <sub>1</sub>	-	3,81	3,81
Área do escoamento a jusante	A <sub>2</sub>	m <sup>2</sup>	0,08229	822,90
Velocidade do escoamento a jusante	v <sub>2</sub>	m/s	0,486	4,86
Número de Froude a jusante	Fr <sub>2</sub>	-	0,34	0,34
Profundidade crítica	y <sub>c</sub>	m	0,1219	12,19
Velocidade crítica	v <sub>c</sub>	m/s	1,09	10,92
Energia mínima	E <sub>min</sub>	m	0,1828	18,28

Essa seção descreve o padrão do escoamento em termos gerais, e as particularidades observadas durante os ensaios, de forma qualitativa. A observação de vídeos, anotações e fotografias do ensaio auxiliaram na compreensão e descrição do comportamento do escoamento. O Apêndice C apresenta uma imagem do padrão de escoamento de cada alternativa ensaiada.

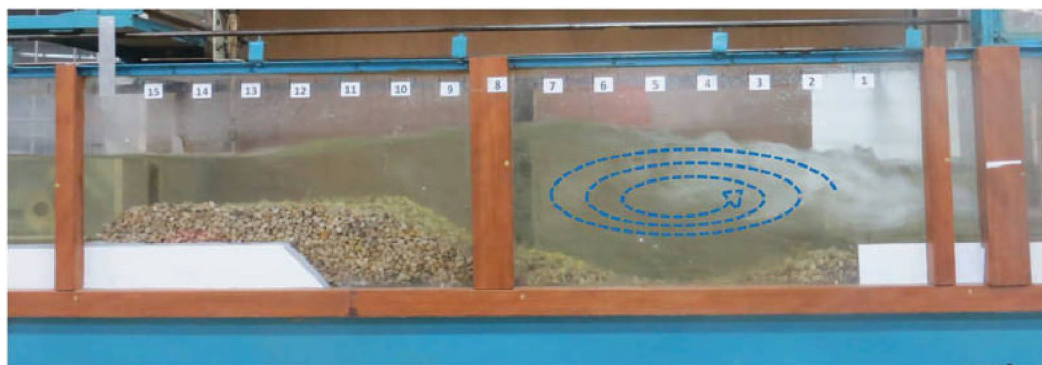
#### 4.1.1 Padrão do escoamento da Alternativa A ( $\eta=1,00$ ; $\theta=0^\circ$ )



O escoamento através dos pilares convencionais mostrou-se bastante agressivo quando comparado ao escoamento apresentado pelas outras alternativas.

Observou-se um grande rolo formado logo a jusante dos pilares, no sentido descendente, conforme esquema da Figura 44.

FIGURA 44 – PADRÃO DO ESCOAMENTO - ALT A



O ressalto hidráulico formado provocou a agitação constante do material logo a jusante dos pilares. Nos ensaios da Alternativa A ocorreu constantemente a exposição do fundo do canal, o qual era recoberto novamente com o material móvel devida à ação do próprio escoamento.

Logo no início do ensaio da Etapa I da Alternativa A formou-se uma grande barra de blocos e parte do material móvel extravasou para fora da caixa de erosão, a uma distância aproximada de 0,50 m, conforme mostra a Figura 45. Esse foi o único ensaio em que isso ocorreu, sendo necessário extrapolar o levantamento da malha xy (Figura 42) para caracterizar toda a erosão formada.

FIGURA 45 – EXTRAZAMENTO DE MATERIAL (ALT A)





A barra formada exerceu um controle sobre o escoamento, e o bocal permaneceu parte do tempo afogado, conforme observa-se na Figura 46.

FIGURA 46 – AFOGAMENTO DO BOCAL – ALTERNATIVA A



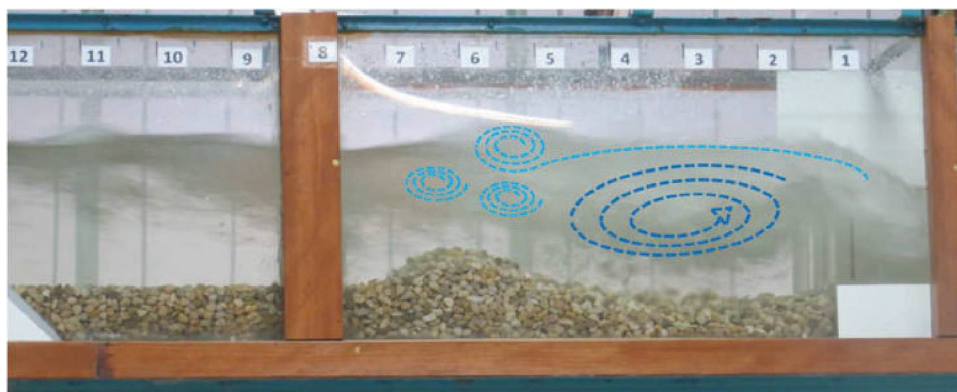
Na Etapa II, após a retirada da barra de material formada, não ocorreu o afogamento do bocal. Em relação ao comportamento hidráulico, observou-se o rolo descendente predominante, conforme já observado na Etapa I dos ensaios. Concluiu-se que o controle exercido pela barra de material não influencia o padrão do escoamento.

Nesta etapa, não houve extravasamento do material para fora da caixa de erosão, já que grande parte do volume de material havia sido removido ao final na Etapa I, o que deixou pouco material exposto à ação erosiva do escoamento na Etapa II.

#### 4.1.2 Padrão do escoamento das alternativas dotadas de *flaring piers*

De maneira geral, o escoamento efluente dos *flaring piers* apresenta características comuns a todas as alternativas. Observa-se a formação de um rolo descendente principal, e a formação de rolos ascendentes menores oriundos de uma parcela do escoamento que é lançada para alto, por cima do rolo descendente, conforme ilustra a Figura 47.

FIGURA 47 – PADRÃO DO ESCOAMENTO - FLARING PIERS (ALT G)



Outra característica comum a todas as alternativas é a formação de um ressalto hidráulico visivelmente mais afastado do fundo do canal e de menor comprimento, quando comparado à Alternativa A, conforme indicado na Figura 48.

FIGURA 48 – PADRÃO DO ESCOAMENTO - FLARING PIERS (ALT C)



Apesar de haver um padrão de escoamento comum às Alternativas B à J, há algumas peculiaridades que são mais visíveis conforme os parâmetros geométricos adotados, que são comentados na sequência.

#### 4.1.2.1 Formação de rabo-de-galo

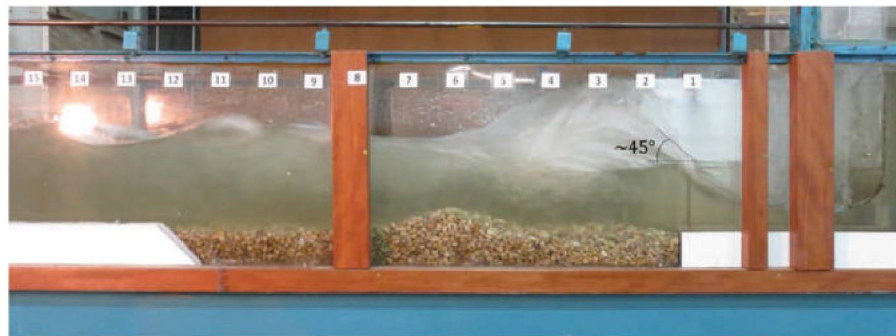
Uma das características dos *flaring piers* é a formação de rabos-de-galo, por consequência do choque entre os jatos efluentes dos vãos adjacentes do vertedouro.

O canal experimental propicia a contração do escoamento quase que coincidente com a seção inicial do ressalto hidráulico, de forma que não é tão evidente a divisão do escoamento em duas parcelas. Entretanto, foi possível observar nos ensaios o direcionamento de uma parcela do escoamento para o alto, passando por cima do rolo descendente principal (Figura 47). Algumas alternativas apresentaram

esse comportamento de forma mais evidente que outras, aproximando-se da descrição do rabo-de-galo mencionada na revisão bibliográfica.

A alternativa B apresentou intensa formação de rabos-de-galo, formado por uma parcela do escoamento lançada para cima, neste caso a um ângulo aproximado de  $45^\circ$ , conforme mostra a Figura 49.

FIGURA 49 – PERFIL DO RABO DE GALO (ALT B)



O rabo-de-galo possui maior altura no vão central, e junto aos meios-vãos ele é um pouco mais baixo, devido à delimitação das paredes do canal, conforme mostra a Figura 50. O rabo-de-galo central oscilou para ambos os lados de forma intermitente, e não adotou posição estável durante o ensaio.

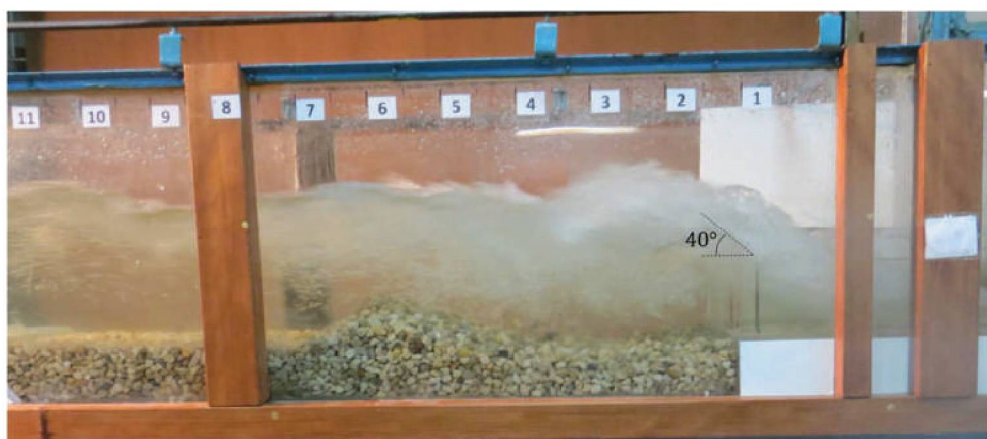
FIGURA 50 – VISTA FRONTAL DO RABO DE GALO (ALT B)



Notou-se esse fenômeno também nas alternativas C, D, E, F e G, embora visualmente com menor intensidade que a alternativa B. Cabe observar que tratam-se de alternativas cujos pilares possuem razão de contração de 0,40 e de 0,50. A Figura 51 mostra um perfil do rabo-de-galo formado na Alternativa F.



FIGURA 51 – PERFIL DO RABO DE GALO (ALT F)



#### 4.1.2.2 Formação de vórtices a jusante dos pilares

Em todas as alternativas houve a formação de um rolo descendente principal. Entretanto, ficou mais evidente nas Alternativas C, E e F pequenos vórtices de forma bem definida logo a jusante dos pilares, conforme mostra a Figura 52.

FIGURA 52 – VÓRTICES A JUSANTE DOS PILARES (ALT C)



Cabe alertar que a formação de vórtices a jusante de estruturas hidráulicas é preocupante devido à potencial ocorrência de cavitações.

## 4.2 COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO



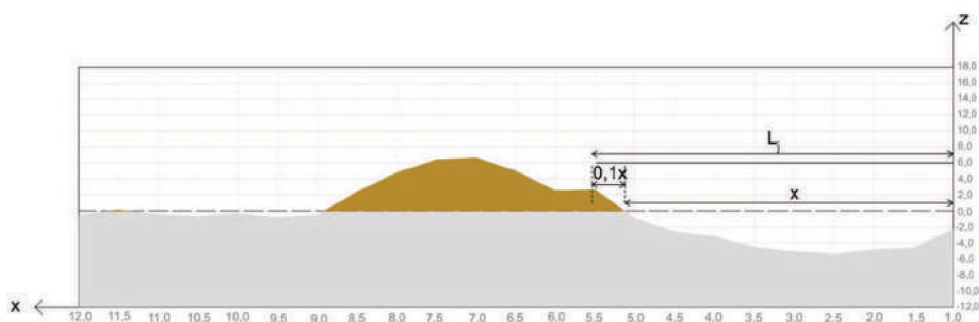
Conforme descrito na sub-subseção 2.2.1.3 desta dissertação, o ressalto hidráulico é um fenômeno altamente turbulento, e não há consenso na bibliografia sobre a determinação da sua seção de término.

Conforme apontado por Li et al. (2000), Chen, Wang e Han (2009) e Yin, Liang e Gong (2010), uma das vantagens da aplicação dos *flaring piers* é a redução do comprimento do ressalto hidráulico (e, conseqüentemente, da bacia de dissipação). Assim, buscou-se nesta pesquisa estimar o comprimento aparente do ressalto hidráulico formado a partir da variação dos parâmetros geométricos dos *flaring piers*.

O objetivo desta análise é a comparação entre as alternativas. Portanto, utiliza-se o mesmo critério para a determinação do comprimento do ressalto hidráulico. As conclusões basearam-se na análise do perfil longitudinal da erosão formada no eixo central do canal (eixo E da Figura 42), e na observação durante os ensaios, e de vídeos e fotografias.

O início do ressalto foi determinado logo a jusante dos pilares. Para a determinação do comprimento do ressalto, foi observado o ponto de inflexão formado pelo material móvel correspondente ao topo da caixa de erosão, ou seja, o ponto onde termina a erosão formada e inicia-se a barra de blocos. Assim, foi medida a distância desse ponto a partir da origem do ressalto ( $x$ ), e foi acrescido 10% deste valor, considerando que, a partir da análise visual, o ressalto hidráulico ainda está terminando seu desenvolvimento. O critério adotado encontra-se esquematizado na Figura 53.

FIGURA 53 – CRITÉRIO - COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO



Onde:

$L_j$  – comprimento do ressalto hidráulico (m);

$x$  – distância entre o início do ressalto hidráulico e o ponto de inflexão entre o fim da erosão e o início da formação da barra (m).

A representação gráfica do comprimento do ressalto hidráulico encontra-se no Apêndice D, onde são apresentados o perfil longitudinal do centro do canal (Eixo E da Figura 42) e uma imagem do ressalto formado durante o escoamento com o objetivo de validar o critério adotado. Os comprimentos de ressalto hidráulico encontrados são apresentados na Tabela 15.

TABELA 15 – COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO

Alt.	$\eta$	$\theta$	$L_j$ (cm)
A	1,00	0°	77,35
B	0,40	15°	46,15
C	0,40	20°	33,01
D	0,40	25°	34,94
E	0,50	15°	53,37
F	0,50	20°	36,52
G	0,50	25°	34,09
H	0,66	15°	47,46
I	0,66	20°	41,28
J	0,66	25°	41,60

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DA FOSSA DE EROSÃO

Essa seção apresenta os resultados obtidos em relação à fossa de erosão formada a partir de cada alternativa. Para cada ensaio foram levantados ao menos 216 pontos referenciados num sistema ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), conforme apresentado na subseção 3.2.2.

O levantamento da fossa de erosão formada permitiu analisar a máxima profundidade de erosão formada, a máxima altura de barra de material formada, o volume erodido, o formato e localização da fossa de erosão e o formato e localização da barra de material.

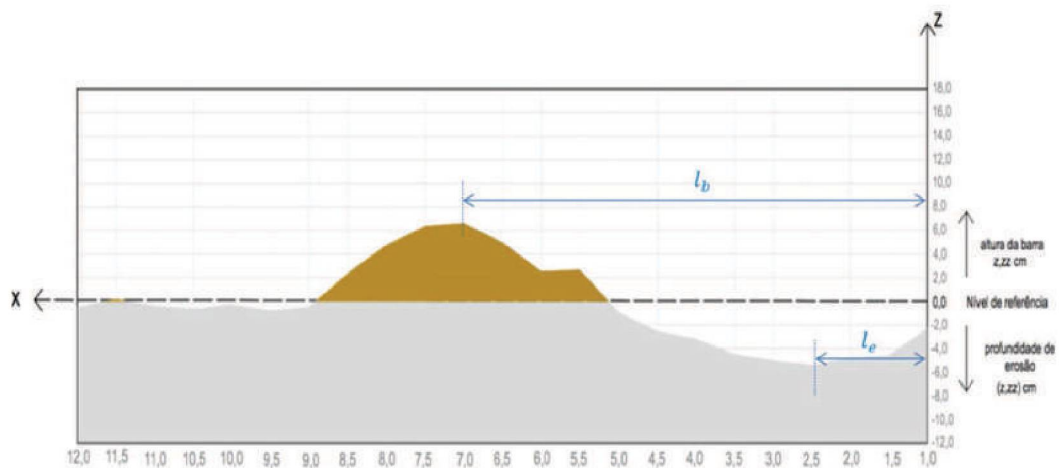
O Apêndice E apresenta todos os resultados brutos levantados após cada ensaio.

#### 4.3.1 Profundidade de erosão e altura de barra

Essa subseção apresenta os resultados da profundidade da fossa de erosão formada para cada alternativa, assim como da máxima altura da barra de material formada.

Para apresentação dos resultados, a referência foi fixada no topo da caixa de erosão, conforme indicado na Figura 54. As profundidades de erosão possuem sentido negativo em relação ao referencial, e são apresentadas entre parênteses. As alturas da barra de material formada possuem sentido positivo. Também é apresentada a que distância, partindo-se da seção imediatamente a jusante dos pilares, ocorreram esses valores máximos. Todos os valores são apresentados em centímetros.

FIGURA 54 – CRITÉRIO - PROFUNDIDADE DE EROSÃO E ALTURA DE BARRA



A Tabela 16 apresenta as profundidades de erosão obtidas na Etapa I ( $t_{1\text{máx}}$ ) e na Etapa II ( $t_{2\text{máx}}$ ), e a distância a que esses valores ocorreram ( $le_{\text{máx}}$ ), referentes ao máximo resultado observado em toda a área da superfície de erosão formada.

TABELA 16 – MÁXIMAS PROFUNDIDADES DE EROSÃO

Alt.	$\eta$	$\theta$	$t_{1\text{máx}}$	$le_{1\text{máx}}$	$t_{2\text{máx}}$	$le_{2\text{máx}}$
A	1,00	0°	(10,33)	35	(10,01)	65
B	0,40	15°	(6,18)	30	(7,33)	25
C	0,40	20°	(5,14)	10	(5,76)	30

D	0,40	25°	(5,24)	5	(5,45)	5
E	0,50	15°	(6,60)	40	(8,06)	30
F	0,50	20°	(5,51)	10	(6,36)	20
G	0,50	25°	(5,28)	10	(6,17)	10
H	0,66	15°	(6,30)	25	(7,69)	40
I	0,66	20°	(5,95)	30	(6,36)	30
J	0,66	25°	(5,60)	15	(5,86)	30

Onde:

$t_{1\text{máx}}$  - profundidade máxima de erosão atingida na Etapa I (cm);

$le_{1\text{máx}}$  – distância de  $t_{1\text{máx}}$  (cm);

$t_{2\text{máx}}$  - profundidade máxima de erosão atingida na Etapa II (cm);

$le_{2\text{máx}}$  – distância de  $t_{2\text{máx}}$  (cm).

A Tabela 17 apresenta as alturas das barras formadas na Etapa I ( $d_{1\text{máx}}$ ) e na Etapa II ( $d_{2\text{máx}}$ ), e a distância a que esses valores ocorreram ( $lb_{\text{máx}}$ ), referentes ao máximo resultado observado em toda a área da superfície de erosão formada.

TABELA 17 – MÁXIMAS ALTURAS DE BARRA

Alt.	$\eta$	$\theta$	$d_{1\text{máx}}$	$lb_{1\text{máx}}$	$d_{2\text{máx}}$	$lb_{2\text{máx}}$
A	1,00	0°	9,05	110	1,74	110
B	0,40	15°	4,93	70	4,04	70
C	0,40	20°	5,80	50	3,39	50
D	0,40	25°	4,93	45	2,85	45
E	0,50	15°	6,42	75	4,35	75
F	0,50	20°	5,93	50	4,76	50
G	0,50	25°	5,83	50	3,60	50
H	0,66	15°	7,53	65	4,54	65
I	0,66	20°	6,75	55	2,86	55
J	0,66	25°	7,30	55	3,49	55

Onde:

$d_{1\text{máx}}$  - altura máxima da barra formada na Etapa I (cm);

$lb_{1\text{máx}}$  – distância de  $d_{1\text{máx}}$  (cm);



$d_{2\text{máx}}$  - altura máxima da barra formada na Etapa II (cm);

$lb_{2\text{máx}}$  - distância de  $d_{2\text{máx}}$  (cm).

Para comparar não somente os valores máximos atingidos em cada alternativa, mas também se obter uma referência igual a todas elas, são apresentados a maior profundidade de erosão e a maior altura de barra formada ao longo do perfil longitudinal central do canal experimental (eixo E da Figura 44). A Tabela 18 mostra os resultados obtidos referentes à profundidade de erosão, e a Tabela 19 mostra os resultados referentes à altura de barra, de ambas as etapas.

TABELA 18 – PROFUNDIDADES DE EROÇÃO NO EIXO LONGITUDINAL CENTRAL

Alt.	$\eta$	$\theta$	$t_{1E}$	$le_{1E}$	$t_{2E}$	$le_{2E}$
A	1,00	0°	(8,52)	30	(8,01)	60
B	0,40	15°	(4,98)	5	(5,79)	10
C	0,40	20°	(5,14)	10	(5,65)	10
D	0,40	25°	(5,24)	5	(5,45)	5
E	0,50	15°	(5,61)	0	(4,96)	10
F	0,50	20°	(5,51)	10	(5,54)	10
G	0,50	25°	(5,28)	10	(6,17)	10
H	0,66	15°	(5,04)	15	(5,69)	15
I	0,66	20°	(5,41)	15	(5,69)	20
J	0,66	25°	(5,69)	15	(5,54)	10

Onde:

$t_{1E}$  – maior profundidade de erosão atingida no eixo E na Etapa I (cm);

$le_{1E}$  – distância de  $t_{1E}$  (cm);

$t_{2E}$  – maior profundidade de erosão atingida no eixo E na Etapa II (cm);

$le_{2E}$  – distância de  $t_{2E}$  (cm).

TABELA 19 – ALTURA DE BARRA NO EIXO LONGITUDINAL CENTRAL

Alt.	$\eta$	$\theta$	$d_{1E}$	$lb_{1E}$	$d_{2E}$	$lb_{2E}$
A	1,00	0°	9,05	120	0,44	100
B	0,40	15°	3,38	60	2,00	80
C	0,40	20°	5,80	50	3,39	50
D	0,40	25°	4,69	50	2,29	50

E	0,50	15°	5,81	70	1,94	65
F	0,50	20°	5,63	55	3,36	55
G	0,50	25°	5,70	50	3,25	50
H	0,66	15°	7,53	70	4,49	70
I	0,66	20°	6,64	60	2,10	60
J	0,66	25°	7,11	65	3,97	55

Onde:

$d_{1E}$  – maior altura da barra formada no eixo E na Etapa I (cm);

$l_{b1E}$  – distância de  $d_{1E}$  (cm);

$d_{2E}$  – maior altura da barra formada no eixo E na Etapa II (cm);

$l_{b2E}$  – distância de  $d_{2E}$  (cm).

O Apêndice F apresenta o perfil longitudinal ao longo do eixo central de cada alternativa ensaiada, da Etapa I e da Etapa II dos ensaios.

Para representação de toda a fossa de erosão formada, o Apêndice G apresenta a visualização de toda a conformação da fossa de erosão e da barra de material formada, referente a todas as alternativas e para ambas as etapas.

#### 4.3.2 Volume total erodido

Essa subseção apresenta os resultados do volume de material erodido da fossa formada para cada alternativa.

A Tabela 20 apresenta o volume erodido na Etapa I ( $V_1$ ), o volume erodido na Etapa II ( $V_2$ ) e o volume total erodido ao final das duas etapas ( $V_t$ ), todos em centímetros cúbicos.

TABELA 20 – VOLUMES ERODIDOS

Alt.	$\eta$	$\theta$	$V_1$	$V_2$	$V_t$
A	1,00	0°	19.250	204	19.454
B	0,40	15°	3.472	1.486	4.958
C	0,40	20°	2.472	985	3.457
D	0,40	25°	2.595	791	3.386
E	0,50	15°	5.433	1.521	6.954
F	0,50	20°	2.707	1.675	4.382

G	0,50	25°	3.615	1.173	4.788
H	0,66	15°	5.442	1.977	7.418
I	0,66	20°	4.369	828	5.197
J	0,66	25°	5.464	1.007	6.471

Onde:

$V_1$  – volume de material erodido na Etapa I ( $\text{cm}^3$ );

$V_2$  – volume de material erodido na Etapa II ( $\text{cm}^3$ );

$V_t$  – volume de material erodido após as duas etapas ( $\text{cm}^3$ ).

#### 4.4 CONTROLE HIDRÁULICO

Conforme descrito na sub-subseção 3.2.1.2, o nível de água de jusante do modelo foi determinado a partir de ensaios com a Alternativa A, cuja razão de contração é unitária e o ângulo de deflexão é nulo. Com a vazão e a profundidade de jusante estabelecidas, a profundidade de montante do escoamento é um parâmetro resultante.

Conforme a bibliografia, o alargamento dos pilares pode causar controle hidráulico a montante do escoamento, o que pode afetar a capacidade de descarga do vertedouro.

Dessa forma, aferiu-se o nível de montante de cada ensaio para verificar eventual controle hidráulico exercido pelo alargamento dos pilares.

Ressalta-se que a leitura apresentada da Alternativa A refere-se à Etapa II do ensaio, pois o objetivo foi verificar o controle exercido exclusivamente pelos pilares, sem considerar a influência da barra de material formada.

Para todas as demais alternativas foram conferidas as leituras a montante em ambas as etapas, e não houve diferença, indicando que o volume de material depositado na barra não exerceu controle sobre o escoamento.

A Tabela 21 apresenta os resultados obtidos.

TABELA 21 – NÍVEL RESULTANTE A MONTANTE

Alt.	$\eta$	$\theta$	NA resultante a montante
A	1,00	0°	0,44
B	0,40	15°	0,44

C	0,40	20°	0,46
D	0,40	25°	0,47
E	0,50	15°	0,44
F	0,50	20°	0,44
G	0,50	25°	0,45
H	0,66	15°	0,44
I	0,66	20°	0,44
J	0,66	25°	0,44

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados.

Considerando que o objetivo do presente estudo é a comparação entre as alternativas, a análise dos resultados é apresentada, na maioria das vezes, em termos percentuais relativos à Alternativa A (pilares convencionais). Os resultados obtidos no estudo também são comparados, quando cabível, aos resultados apresentados na bibliografia.

### 5.1 CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO

Observa-se que há diferenças significativas entre o padrão do escoamento efluente de pilares convencionais e de *flaring piers*. A maior diferença observada foi o estreitamento do jato pelos *flaring piers* e seu lançamento para o alto.

Apesar de tratar-se de outro mecanismo de dissipação, o escoamento proveniente dos *flaring piers*, no presente estudo, apresentou semelhança com os dissipadores do tipo *roller-buckets*.

A instalação experimental utilizada no presente estudo possui limitações físicas que impedem a completa simulação das diferenças entre o padrão do escoamento de pilares convencionais e *flaring piers*, devido à delimitação das unidades reproduzidas (1 vão + 2 meios vãos). Entretanto, a realização dos ensaios foi suficiente para verificar os aspectos citados.

A ocorrência de vórtices a jusante dos pilares de seção variável deve ser melhor investigada, já que, devido aos efeitos de escala, sua reprodução em



protótipos pode ser distorcida, e é um fenômeno que pode ocasionar cavitações em estruturas hidráulicas.

## 5.2 COMPRIMENTO APARENTE DO RESSALTO HIDRÁULICO

### 5.2.1 Comprimento do ressalto hidráulico convencional

Os dados do modelo ( $y_1$ ,  $y_2$ ,  $v_1$ ,  $v_c$  e  $Fr_1$ ) foram aplicados nas Equações 03 a 23, apresentadas na Tabela 2, para verificação do comprimento teórico do ressalto hidráulico convencional (Alternativa A), conforme proposições encontradas na bibliografia. Os resultados são apresentados no Apêndice H.

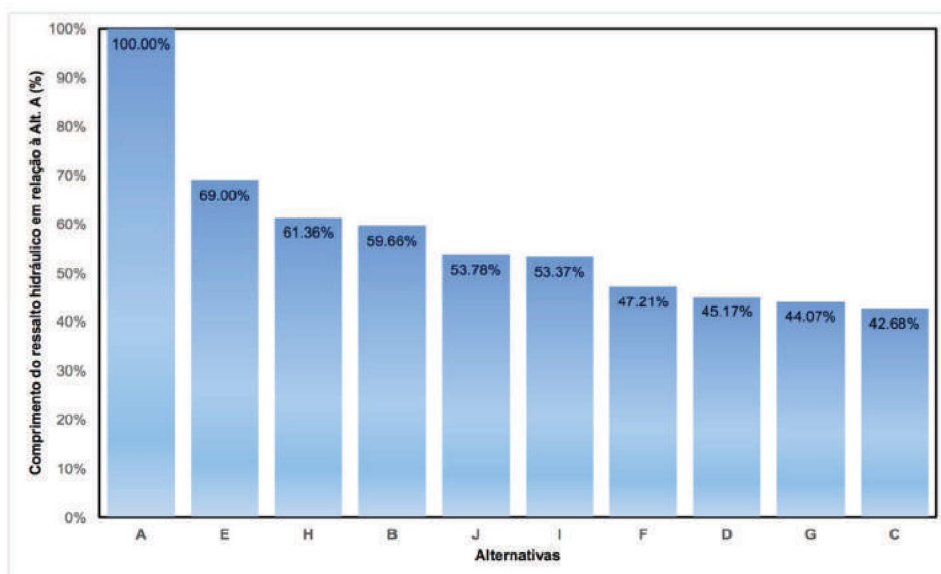
O ressalto hidráulico formado a partir da Alternativa A apresentou comprimento de aproximadamente 0,85 m. Das 21 equações apresentadas na Tabela 3, apenas 4 apresentaram resultados próximos ao observado. A Equação 10 (Aravin, 1935) resultou no comprimento de 0,87 m, cerca de 2% maior que o resultado observado no modelo. As Equações 3 (Riegel e Beebe, 1917), 12 (Bakhmeteff-Matzke, 1936) e 17 (Wu, 1949) resultaram em um comprimento de ressalto hidráulico de aproximadamente 0,81 m, valor 5% menor que o resultado observado nesse estudo. As demais equações apresentaram resultados acima do observado no modelo.

Destaca-se que as equações propostas na Tabela 2 sugerem o comprimento teórico do ressalto hidráulico. A presença do ar no escoamento, mesmo em pilares sem os alargamentos, já é favorável em termos de dissipação de energia, quando comparado a um escoamento bidimensional. Ainda, a aplicação prática deste parâmetro, adotada por projetistas de obras hidráulicas quando do dimensionamento de bacias de dissipação leva a valores bem menores. Ainda deve-se levar em conta as características geomecânicas do maciço rochoso, que podem levar a otimizações no dimensionamento dessas estruturas.

### 5.2.2 Comprimento do ressalto hidráulico efluente de *flaring piers*

A Figura 55 ilustra a comparação do comprimento do ressalto hidráulico medidos nos ensaios de todas as alternativas ensaiadas, referenciadas em relação à Alternativa A (100%), em ordem decrescente.

FIGURA 55 – COMPRIMENTOS DO RESSALTO HIDRÁULICO EM RELAÇÃO À ALT A

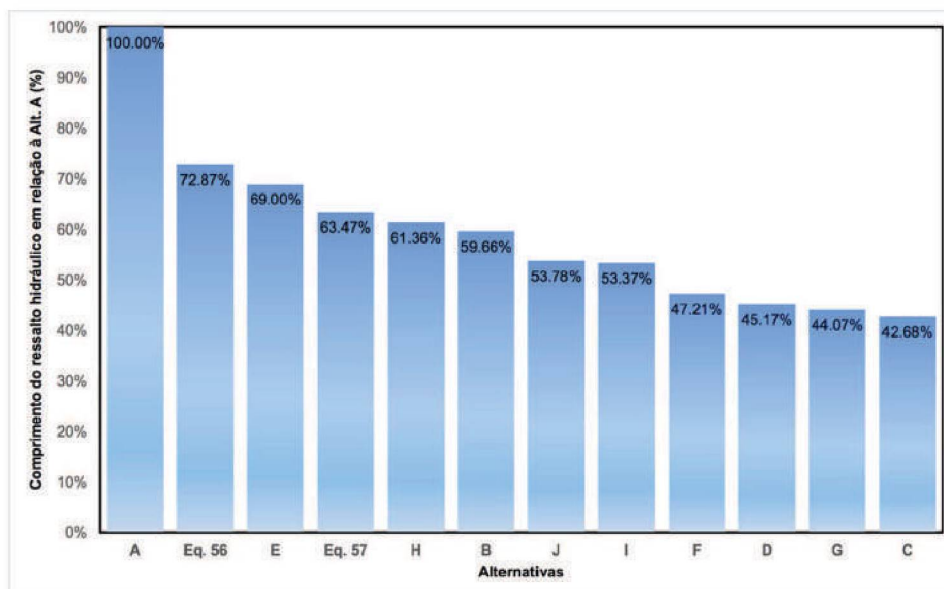


Observa-se que nas alternativas de pilares dotadas de *flaring piers* há redução de 31 a 57% no comprimento do ressalto hidráulico, comparando-se com a alternativa de pilares convencionais.

Chen, Wang e Han (2009) propuseram as equações 36 e 37 para determinação do comprimento do ressalto hidráulico efluente de *flaring piers*. Aplicando-se os dados de entrada ( $y_1 = 0,05$  m e  $y_2 = 0,211$  m), tem-se comprimentos de ressalto iguais a 0,62 m (Equação 36) e 0,57 m (Equação 37).

Conforme o gráfico da Figura 56, os resultados obtidos no presente estudo estão aderentes à aplicação das equações propostas por Chen, Wang e Han (2009).

FIGURA 56 – COMPARAÇÃO DOS COMPRIMENTOS DO RESSALTO HIDRÁULICO EM RELAÇÃO À ALT A CONSIDERANDO AS EQ 36 E 37



Observa-se que as Alternativas B, C, D, F, G, H, I e J apresentaram resultados menores que os da Equação 37. A Alternativa E apresentou resultado entre as Equações 36 e 37.

Ao considerar apenas as alternativas dotadas de *flaring piers*, encontra-se diferenças relativamente pequenas de comprimentos de ressalto hidráulico das Alternativas B, H e E, quando comparados aos resultados das equações propostas por Chen, Wang e Han (2009).

Ressalta-se que Chen, Wang e Han (2009) chegaram a essas equações através de ensaios com escoamento cujo número de Froude de montante ( $Fr_1$ ) variou entre 6 e 11, que são superiores ao valor do número de Froude do presente estudo. Também cabe mencionar que os autores não apresentaram no estudo os parâmetros geométricos utilizados nos ensaios, que levaram ao ajuste das equações 36 e 37.

Também é importante mencionar que os autores não apresentaram expressões de comprimento de ressalto hidráulico considerando pilares convencionais. Os autores compararam a redução do comprimento do ressalto hidráulico com a Equação de Elevatorski (1959), e citaram a redução no comprimento de 48% em relação a ela.

Li et al. (2000) também propuseram equações para determinação do ressalto hidráulico para vertedouros convencionais (Equação 31) e dotados de *flaring piers* (Equação 32). Entretanto, os resultados não se ajustaram aos valores obtidos nos ensaios, nem mesmo para a alternativa A.

Aplicando-se os dados de entrada do modelo na equação proposta por Li et al. (2000) obtém-se o comprimento de ressalto hidráulico de 1,31 m, valor 54% maior que o observado no ensaio.

Comparou-se o resultado da Equação 31 com os resultados das Equações 03 a 23, apresentadas na Tabela 2. O resultado da Equação 23 (Teixeira, 2003) e da Equação 18 (Peterka, 1957) encontram-se muito próximos ao resultado da Equação 31, proposta por Li et al (2000), sendo apenas 1,68% e 1,75% menor, respectivamente.

A comparação que é possível fazer é a redução do comprimento do ressalto hidráulico proveniente de *flaring piers* (Equação 31) em relação aos pilares convencionais (Equação 32), propostas por Li et al (2000). O resultado sugere uma redução de 22%, valor este menor que a redução observada nesse estudo, que indicou reduções de 31 a 57%. Nesse sentido, é importante observar que os parâmetros estudados pelo autor ( $\eta$ ,  $\theta$ ,  $Fr_1$ ) são equivalentes ou próximos aos do presente estudo.

Yin, Liang e Gong (2010) também desenvolveram estudos acerca do comprimento do ressalto hidráulico proveniente de pilares dotados de *flaring piers*. As expressões sugeridas pelos autores (Equações 41 e 42) não se ajustaram aos resultados do presente estudo. Entretanto, os autores mencionam a redução no comprimento do ressalto hidráulico proveniente de pilares dotados de *flaring piers* em cerca de 50%, quando comparado aos pilares convencionais. Essa redução está compatível com a encontrada no presente estudo.

Por fim, conclui-se que todas as alternativas dotadas de *flaring piers* levam à redução no comprimento do ressalto hidráulico, quando comparadas à Alternativa A. Dentre elas, as alternativas que levaram aos menores comprimentos de ressalto hidráulico possuem razões de contração de 0,40 e 0,50 e ângulos de deflexão de 20° e 25°. Também se observou que as alternativas cujo ângulo de deflexão é de 15° (B, E e H) levaram a comprimentos maiores de ressalto hidráulico dentre as alternativas dotadas de *flaring piers*, ainda que a diferença seja relativamente pequena.

### 5.3 ANÁLISE DA CARACTERIZAÇÃO DA FOSSA DE EROSÃO

#### 5.3.1 Profundidade de Erosão



A Figura 57 apresenta as profundidades máximas de erosão alcançadas e a Figura 58 mostra as maiores profundidades de erosão atingidas ao longo do eixo longitudinal central, na Etapa I e na Etapa II, de todas as alternativas, relacionados aos valores obtidos da Alternativa A (100%).

FIGURA 57 – PROFUNDIDADES MÁXIMAS DE EROSÃO

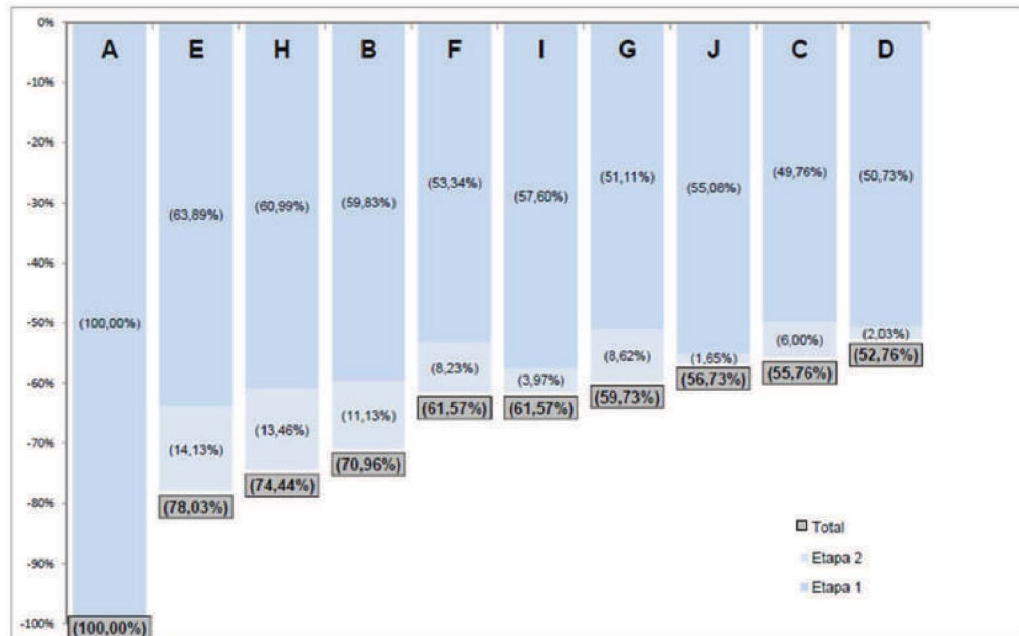
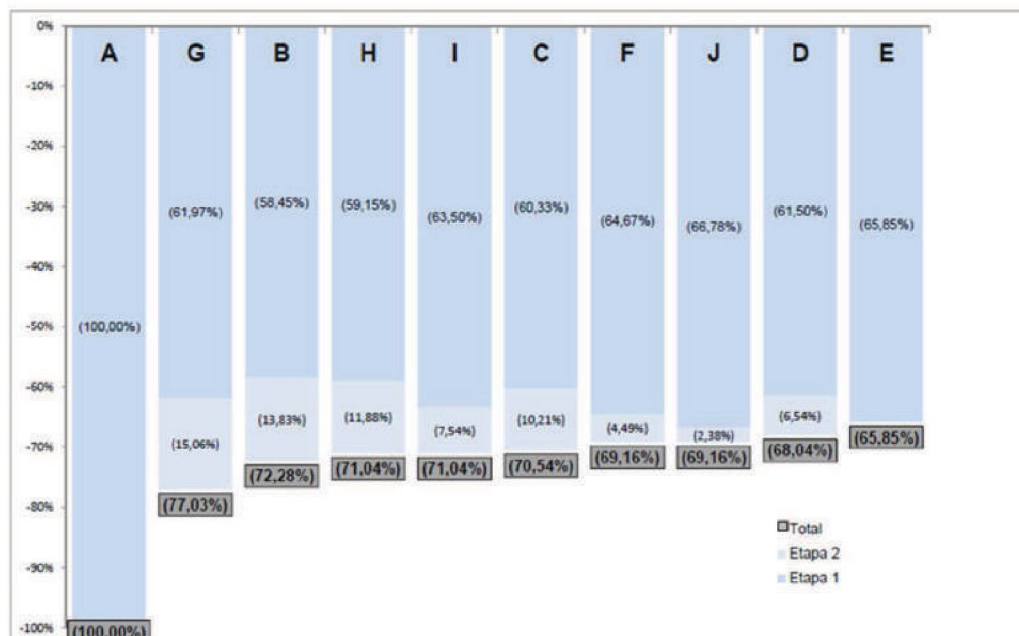


FIGURA 58 – PROFUNDIDADE AO LONGO DO EIXO LONGITUDINAL CENTRAL



Observa-se que, ao longo do eixo longitudinal central (Eixo E), as profundidades finais atingidas, após as duas etapas, apresentaram valores próximos entre as alternativas dotadas de *flaring piers*. Ao considerar os valores máximos, essa diferença aumenta.

Entretanto, todas as alternativas dotadas de *flaring piers* apresentaram profundidades de fossa de erosão menores quando comparadas à Alternativa A.

Considerando somente os valores máximos, as alternativas dotadas de *flaring piers* resultaram em redução na profundidade de erosão de 26 a 47% em relação à alternativa de pilares convencionais. Tomando-se por base somente o perfil longitudinal central, essa redução está na faixa de 23 a 34%.

Li et al. (2000) sugeriu em seus estudos uma redução na profundidade de erosão de 60%, valor superior ao encontrado no presente estudo. Em seu estudo, o autor concluiu que as alternativas cujas razões de contração são de 0,40 apresentaram menores profundidades de erosão, assim como as alternativas cujos ângulos de deflexão são de 20°.

Lara (2011) encontrou a redução na profundidade da fossa de erosão de 37% na adoção da alternativa cuja razão de contração é 0,70 e ângulo de deflexão é 15°, e de 44% na adoção da alternativa cuja razão de contração é 0,50 e ângulo de deflexão é 19°. Apesar de ter focado seu estudo em um vertedouro do tipo salto de esquí, essa proporção na redução da profundidade da fossa de erosão se aproxima à encontrada no presente estudo.

A Alternativa D apresentou a menor profundidade de erosão dentre todos os ensaios. Porém cabe ressaltar que esse ponto ocorreu muito próximo ao pé do vertedouro, o que pode ser um inconveniente.

### 5.3.2 Altura da Barra

As Figuras 59 e 60 apresentam as alturas de barra formada máximas e ao longo do eixo longitudinal central do canal (eixo E da Figura 44), de todas as alternativas, em relação à Alternativa A (100%), referente à Etapa I.

Como na Etapa II parte do material já havia sido erodido e retirado da caixa de erosão, os resultados sobre a altura de barra perdem a validade de comparação, já que o volume de material exposto à ação do escoamento não era o mesmo para cada alternativa. Assim, somente serão analisados os resultados da Etapa I.

FIGURA 59 – ALTURAS MÁXIMAS DE BARRA – ETAPA I

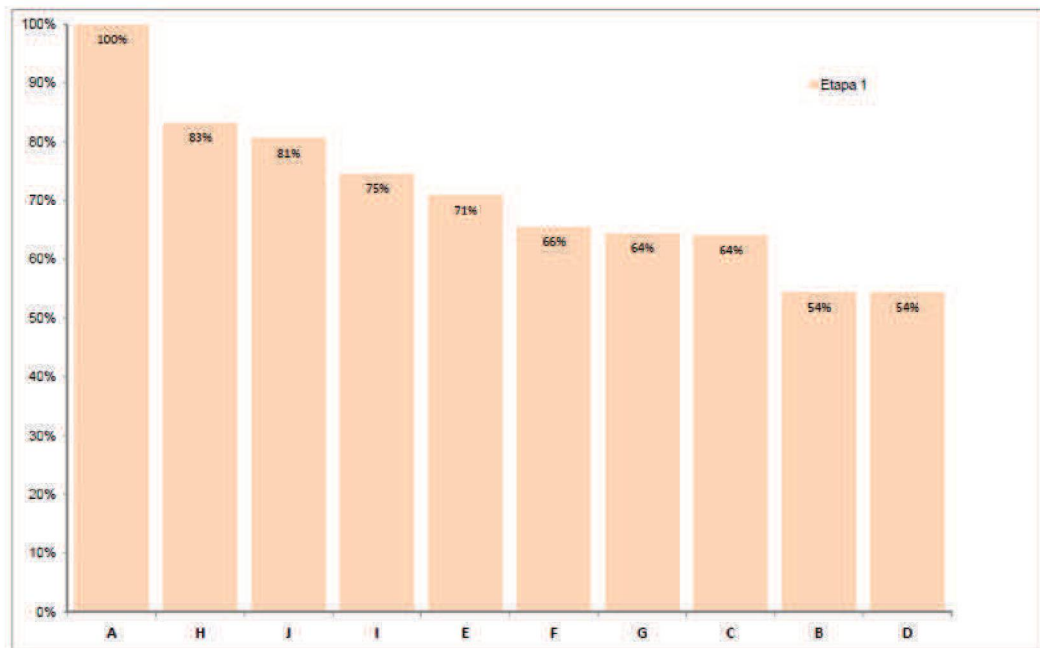
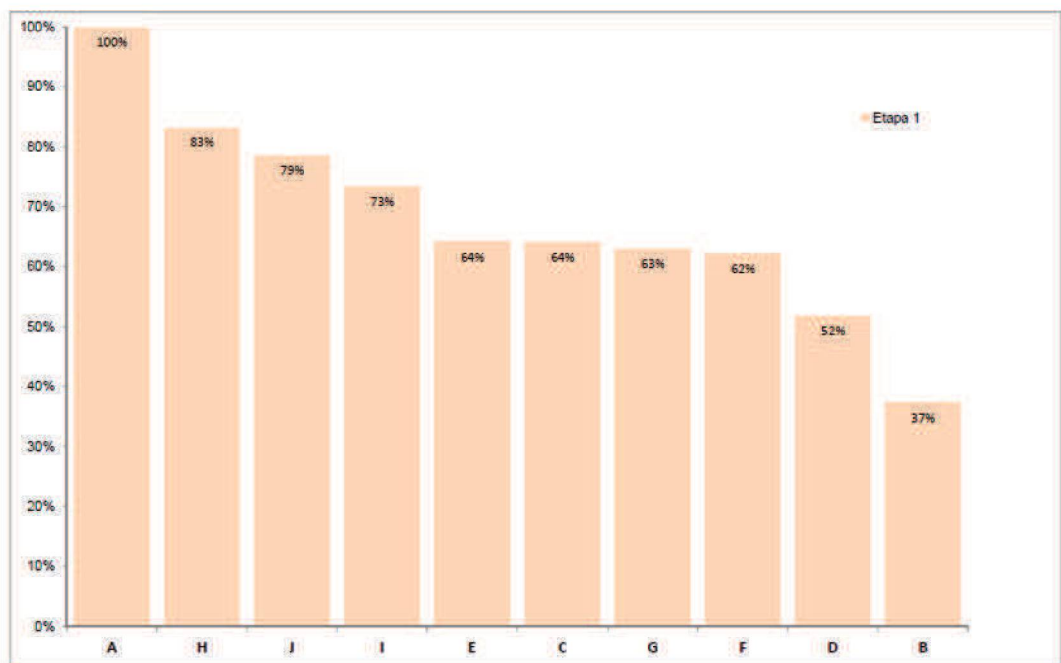


FIGURA 60 – ALTURAS DA BARRA NO EIXO LONGITUDINAL CENTRAL – ETAPA I



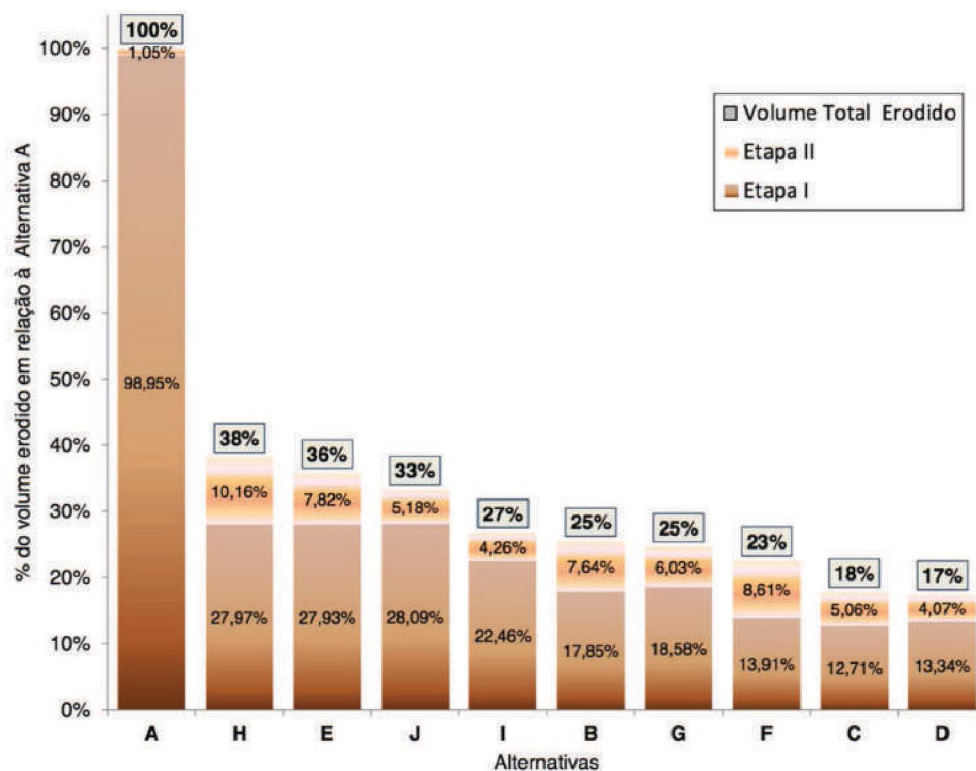
As conclusões acerca deste tópico são mais limitadas, já que não há comparações na bibliografia sobre as diferenças das alturas de barra de material formada devido ao escoamento de um vertedouro com pilares convencionais e dotado de *flaring piers*.

Notadamente, as barras formadas pelas alternativas dotadas de *flaring piers* apresentaram menores alturas quando comparadas à alternativa de pilares convencionais. As alternativas B e D, cujas razão de contração é de 0,40, apresentaram as menores barras, enquanto que as alternativas H, I e J, cuja razão de contração é de 0,66, apresentaram as maiores barras.

### 5.3.3 Volume total erodido

A Figura 61 mostra os volumes erodidos, na Etapa I e na Etapa II, e a indicação do volume total erodido que corresponde à soma das duas etapas, de todas as alternativas, em ordem decrescente, em relação à Alternativa A.

FIGURA 61 – VOLUMES TOTAIS ERODIDOS EM RELAÇÃO À ALTERNATIVA A



Todas as alternativas dotadas de *flaring piers* apresentaram volume de material erodido bem inferior à Alternativa A. A redução média, considerando as 9 alternativas, foi de 73%.

Dos estudos sobre os *flaring piers*, estão disponíveis apenas poucos trabalhos que envolvem a avaliação da redução de volume de material erodido.



Li et al. (2000) realizaram estudo com material de fundo móvel e utilizaram *flaring piers* com parâmetros geométricos próximos aos do presente estudo. Os autores mencionam a redução do volume de material erodido de 50% com a utilização de *flaring piers*, quando comparados aos pilares convencionais, valor um pouco menor que o encontrado no presente estudo. Os autores não apresentaram qual dos parâmetros geométricos dos *flaring piers* ( $\eta$  e  $\theta$ ) levou ao menor volume de material erodido pelo escoamento.

Lara (2011) menciona a redução no volume de material erodido de 52% na adoção da alternativa cuja razão de contração é 0,70 e ângulo de deflexão é 15°, e de 67% na adoção da alternativa cuja razão de contração é 0,50 e ângulo de deflexão é 19°.

No que se refere aos parâmetros geométricos ( $\eta$  e  $\theta$ ), a alternativa cuja razão de contração é 0,50 e ângulo de deflexão é 19° do estudo de Lara (2011) é praticamente semelhante à Alternativa F do presente estudo, que apresentou redução no volume de material erodido de 73%, proporção próxima à encontrada por Lara (2011).

Conclui-se que todas as alternativas dotadas de *flaring piers* levam à redução no volume total de material erodido, quando comparadas à alternativa de pilares convencionais. Dentre elas, as alternativas que levaram aos menores comprimentos de ressalto hidráulico possuem razões de contração de 0,40 e 0,50 e ângulos de deflexão de 20° e 25°.

Destaca-se que houve correlação entre alternativas ao analisar o menor comprimento de ressalto hidráulico com o menor volume de material erodido. A Tabela 22 apresenta as alternativas organizadas dos menores para os maiores valores obtidos nos ensaios.

TABELA 22 – ORDENAÇÃO DAS PROFUNDIDADES DE EROÇÃO EM RELAÇÃO À ALT. A

Comprimento do ressalto hidráulico	C	G	D	F	I	J	B	H	E	A
Volume total de material erodido	D	C	F	G	B	I	J	E	H	A

#### 5.3.4 Controle Hidráulico

As alternativas C, D e G apresentaram sutil aumento no nível de montante, conforme mostra a Tabela 23, quando comparadas ao nível de montante da Alternativa A.

TABELA 23 – COMPARAÇÃO DO NÍVEL RESULTANTE DE MONTANTE

Alt.	$\eta$	$\theta$	Diferença em relação à Alt. A (%)
B	0,40	15°	0
C	0,40	20°	4,5
D	0,40	25°	6,8
E	0,50	15°	0
F	0,50	20°	0
G	0,50	25°	2,3
H	0,66	15°	0
I	0,66	20°	0
J	0,66	25°	0

De fato, foi possível observar nos ensaios o afogamento do bocal, conforme mostra a Figura 62.

FIGURA 62 – AFOGAMENTO DO BOCAL DAS ALTERNATIVAS B, D E G



A Alternativa C ( $\eta=0,40$  e  $\theta=20^\circ$ ) foi estudada por Cruz (2016), que chegou à mesma conclusão do presente estudo, em relação ao controle do escoamento a montante.

Alguns estudos foram realizados para a investigação da influência dos *flaring piers* na capacidade de descarga do vertedouro. Li et al. (2003) estudou essa questão em um vertedouro associado a uma barragem em arco, e propôs expressões (Equações 53 e 54) para a determinação do ponto de início do alargamento. Mo et al. (2007) também propuseram um método para determinar este parâmetro. Conforme Zhang et al. (2011) os *flaring piers* com geometria do tipo Y possuem a função justamente de evitar o controle do escoamento a montante pelos pilares na ocorrência de vazões mais altas.

O modelo hidráulico reduzido utilizado na pesquisa não permite a investigação de soluções mitigatórias para evitar o controle hidráulico exercido pelos pilares alargados. Entretanto, foi possível confirmar a preocupação relatada na bibliografia de que as contrações causem influência na capacidade de descarga do vertedouro.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foi avaliado o escoamento através de pilares de seção variável (*flaring piers*), por meio da variação de seus parâmetros geométricos ( $\eta$  e  $\theta$ ), e comparado com o escoamento através de pilares convencionais em modelo hidráulico reduzido.

No estudo foi possível concluir que os pilares de seção variável podem influenciar o escoamento de forma positiva, por eventualmente trazer benefícios no que se refere à redução de processos erosivos e otimização de estruturas como bacias de dissipação. Dos resultados, observou-se que os *flaring piers* podem conduzir à redução do comprimento do ressalto hidráulico, além de menores profundidades de erosão e menor volume de material erodido, quando comparados aos pilares de vertedouro convencionais.

O presente estudo confirma as conclusões elencadas por Cruz (2016), de que pilares com razão de contração de 0,40, apesar da redução das velocidades junto ao fundo do canal, ocasionam controle hidráulico a montante do escoamento.

Foi possível concluir que as alternativas com a área de escoamento mais contraídas ( $\eta=0,40$  e  $\eta=0,50$ ) apresentarem os melhores resultados no que se refere a uma eventual otimização de bacia de dissipação. Entretanto, faz-se necessário investigar o controle hidráulico por elas exercidas. Nesse sentido, o ângulo de deflexão parece influenciar, e merece maiores investigações.



Devido às limitações físicas do modelo utilizado no estudo, faz-se necessário investigar uma série de aspectos que parecem ser determinantes na utilização dos *flaring piers*.

A posição de início do alargamento dos pilares parece influenciar diretamente na capacidade de descarga do vertedouro, assim como a escolha da geometria da seção do pilar. Conforme pesquisa bibliográfica, os pilares do tipo Y são os mais aplicados nas obras chinesas, seguidos pelos pilares do tipo X. Dessa forma, é importante compreender melhor essas aplicações.

Outro fenômeno que deve ser considerado é a cavitação, que pode ser causada por vórtices a jusante do alargamento dos pilares, e que não foi foco da pesquisa.

Considerando que o presente estudo considerou os fenômenos hidráulicos envolvidos na aplicação dos *flaring piers*, não foram abordados os custos adicionais para a execução do alargamento de pilares e suas dificuldades construtivas. Dessa forma, para eventuais aplicações, faz-se necessário fazer essas investigações e considerá-las na viabilidade econômica do empreendimento.

O presente estudo permitiu atestar as vantagens citadas na bibliografia, no que se refere à redução de processos erosivos e à otimização de bacias de dissipação. As Alternativas C ( $\eta=0,40$  e  $\theta=20^\circ$ ) e D ( $\eta=0,40$  e  $\theta=25^\circ$ ) foram as que apresentaram melhores resultados no que se refere à redução do comprimento do ressalto hidráulico, da profundidade da fossa de erosão formada e do volume de material erodido. A Alternativa G ( $\eta=0,50$  e  $\theta=25^\circ$ ) também se mostrou favorável segundo esses aspectos. Entretanto, essas alternativas foram as que indicaram possível controle hidráulico a montante da estrutura de descarga. Recomenda-se o estudo dessas alternativas em modelos com a possibilidade de variação da posição do início do alargamento e da geometria dos pilares.

A aplicação de pilares de seção variável em vertedouros parece trazer uma série de vantagens no que se refere à redução de processos erosivos e otimizações de bacias de dissipação. Com um comportamento hidráulico bastante peculiar, bastante diferente do observado em vertedouros com pilares convencionais, trata-se de uma técnica inovadora, até o momento só aplicada na China.

Não é conhecido até o momento um conjunto de critérios completo e que aborde todos os aspectos que permitem a aplicação dos *flaring piers*. Dessa forma, o conhecimento e o domínio dessa técnica são valiosos e podem trazer diversos



benefícios, tanto para o interesse científico, quanto para aplicações práticas dessas estruturas.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, A. A. M. **Caracterização das Solicitações em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico com Baixo Número de Froude**. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2008.
- BÉLANGER, J. B. **Essai sur la Solution Numérique de Quelques Problèmes Relatifs au Mouvement Permanent des Eaux Courantes**. Paris, Chez Carilian-Goeury, 1828.
- CAIHUAN, W.; GUOBING, H.; YUANMING, C. Development and Practice of a New Type Dissipator in Geheyan Project. Yangtze River Scientific Research Institute. Wuhan, 2002.
- CHEN, C.; ZHANG, F. Research on Effect of Contraction Angle and Ratio of Flaring Piers on Impact. E-proceedings of the 36th IAHR world Congress, Netherlands, n. 1992, p. 1–9, 2015.
- CHEN, D.; WANG, S.; HAN, J. Experimental Research on the Length of 3D Hydraulic Jump in Joint Energy Dissipator. Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering: Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS. v. 6, p.2037–, 2009.
- CHEN, S. H. Hydraulic Structures. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- CRUZ, S. T. **Avaliação do Escoamento com Superfície Livre a Jusante de Descarregadores de Fundo Providos de Pilares de Seção Variável – Estudo em Modelo Hidráulico Reduzido**. Trabalho de Conclusão de Curso, UP, Curitiba, 2016.
- DAI, S.; LIU, H.; JIAN, Y.; YANG, J.; BIAN, X. Method of Calculating the Hydraulic Jump Equation of X-shape Flaring Gate Pier. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, v. 32, n. 10, p. 47–52, 2015.
- DENG, Y.; LIN, K.; HAN, L. Design and prototype test of stepped overflow surface of Dachao Shan hydropower station in China. 4th Roller Compact Concrete Dams Symposium, p. 431–432, Madrid, Spain, 2003.
- DOUGLAS, T. H. Pumped Storage: Proceedings of the conference. Institution of Civil Engineers at Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, 2 a 4 de abril, 1990.
- ELETROBRAS – Website da Eletrobrás. Disponível em <http://www.eletrobras.com>. Acesso em 21/10/2016.
- ELEVATORSKY, E. A. **Hydraulic Energy Dissipators**. New York, MacGraw-Hill, 1959.

FRIZELL, K. W.; RENNA, F. M.; MATOS, J. Cavitation Potential of Flow on Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, V. 148, n. 8, 2015

GAO, J.; LIU, Z.; GUO, J. **Energy Dissipation For High Dams**. Large Dams in China – A Fifty Year Review. Chinese National Committee on Large Dams, 2000.

HAGER, W. H. Energy Dissipators and hydraulic jump. Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, 1992.

HOU, X. X.; YANG, J. R.; ZHENG, J. S. The Numerical Simulation for Effects of Y-Shape Flaring Gate Pier Body Type on Aerated Cavity Length and Negative Pressure of Steps. **Applied Mechanics and Materials**, v. 488–489, p. 847–853, 2014.

HU, J.; MA, F. The Comprehensive Investigation Method for Sudden Increases of Uplift Pressures Beneath Gravity Dam. Journal of Performance of Constructed Facilities, v. 30, n. 5, 2016.

KHATSURIA, R.M. **Hydraulic of Spillways and Energy Dissipators**. New York: Marcel Dekker, 2005.

LARA, R. **Utilização de Defletores em Fenda e Pilares Alargados para Redução da Erosão Provocada por Vertedouros com Salto de Esquí**. Dissertação de Mestrado, UFPR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Curitiba, 2011.

LI, F.; LIU, P.; XU, W.; TIAN, W. Experimental Study on Effect of Flaring Piers on Weir Discharge Capacity in High Arch Dam. **Journal of Hydraulic Engineering**, n. 11, p. 43–49, 2003.

LI, G. Study of Energy Dissipation on Low Froude Number Flow. China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR), p. 151–157, 2002.

LI, Z.; PAN, Y.; HAN, L.; CHANG, Z. Hydraulics of Stilling Basin with Flaring Gate Piers. **Advances in Water Science**, v. 11, n. 1, 2000.

LI, N. W.; LIU, C.; DENG, J.; ZHANG, X. Theoretical and experimental studies of the flaring gate pier on the surface spillway in a high-arch dam. **Journal of Hydrodynamics**, Vol.24(4), pp.496-505, 2012.

LIN, B.; LI, G.; CHEN, H. Hydraulic Research in China. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 113, n. 1, p. 47–60, 1987.

MATOS, J.; MEIRELES, I. Hydraulic of stepped weirs and dam spillways: engineering challenges, labyrinths of research. 5th International Symposium on Hydraulic Structures: Hydraulic Structures and Society: Engineering Challenges and Extremes. Brisbane, Australia, 2014.

MO, Z.; WU, C.; HONG, L.; BO, W.; HU, Y. Relationship of Location of Flaring Gate Piers, Froude Number at Section of Starting Flare and Weir Head. **Journal of Sichuan University**, v. 39, n. 4, p. 26–30, 2007.

NEIDERT, S. H. Desempenho de Vertedores – Dissipação de Energia - Cavitação e Erosão. Publicação nº 37 do Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza. Separata do: Relatório Geral apresentado no XVIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Rio de Janeiro, 1980.

NI, H. Simplified Calculation Method Stilling Basin with Flaring Gate Pier. **Journal of Hydraulic Engineering**, n. 6, p. 19–25, 1998.

NOVAK, P.; MOFFAT, A.I.B.; NALLURI, C.; NARAYANAN, R. **Hydraulic Structures**. Fourth Edition, 2007.

PANJIAKOU Hydro Experince in Design. Water Conservation Engineering Papers, 2006.

PETERKA, A. J. Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators, U.S. Bureau of Reclamation. Engineering Monograph n. 25. Denver, Colorado, 7th printing, 1983.

RAJARATNAM, N. Hydraulic jump as a wall jet. **Journal of Hydraulic Division**, v. 91, p. 107 – 132, 1965.

RAJARATNAM, N. Hydraulic jump. **Advances in Hydrosience**. v. 4, pp. 197 - 280, 1967.

SCHULZ, H. E.; NÓBREGA, J. D.; SIMÕES, A. L. A.; SCHILZ, H.; PORTO, R. M. Hydrodynamics – Concepts and Experiments, Chapter 4 – Details of Hydraulic Jumps for Design Criteria of Hydraulic Structures, 2015.

TOLMASQUIM, M. T. Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica / Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord.). – EPE: Rio de Janeiro, 2016.

WEI, W. R. Experimental Study on Hydraulic Characteristics of X-Shape Flaring Gate Pier and Deflecting Stilling Basin United Energy Dissipator. *Applied Mechanics and Materials*, v. 376, p. 279–283, 2013.

YAN, G.; HU, Q.; CHEN, F. Stabilization of the bottom plate of still basin under the action of jet flow from a flaring gate pier. *Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management*, p. 1775–1780, 2005.

YIN, J.; LIANG, Z.; GONG, H. Experimental study on characteristics of 3D hydraulic jump of flaring gate piers. *Journal of Hydraulic Engineering CHES*, v. 41, n. 11, p. 1333–1338, 2010.

ZHANG, S.; YU, M.; WANG, L.; PANG, B. Hydraulic Characteristics Analysis of Different Energy Dissipation Types for High Dam Discharge. *Journal of Hydroelectric Engineering*, v. 34, no. 3, p. 66 - 72, 2015.



ZHANG, T.; WU, C.; ZHENG, Q. Comparison on Somatotype of X- and Y- shape Flaring Gate Pier Connected with Stepped Spillway. *Advanced Materials Research*, v. 255-260, p. 3661-3665, 2011.

# APÊNDICE A – PERFIL E PLANTA DO CANAL EXPERIMENTAL

FIGURA 63 – PLANTA DO CANAL EXPERIMENTAL

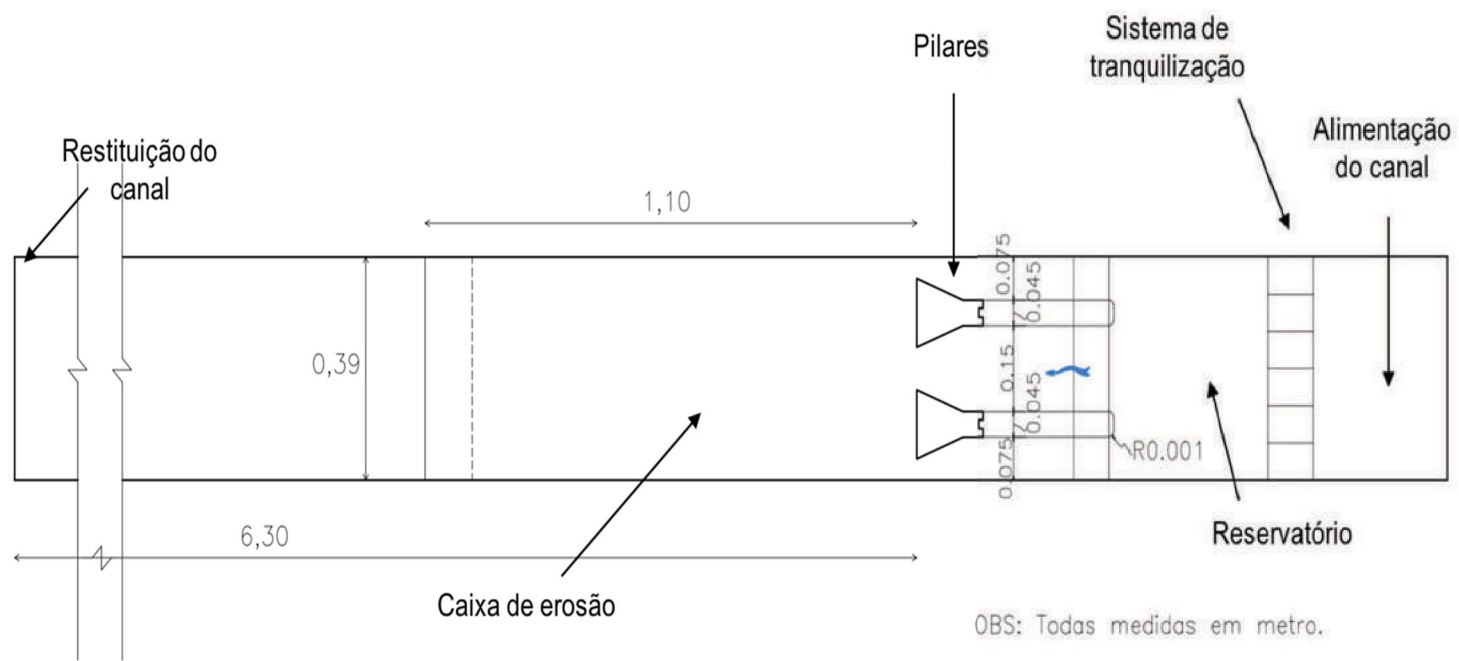
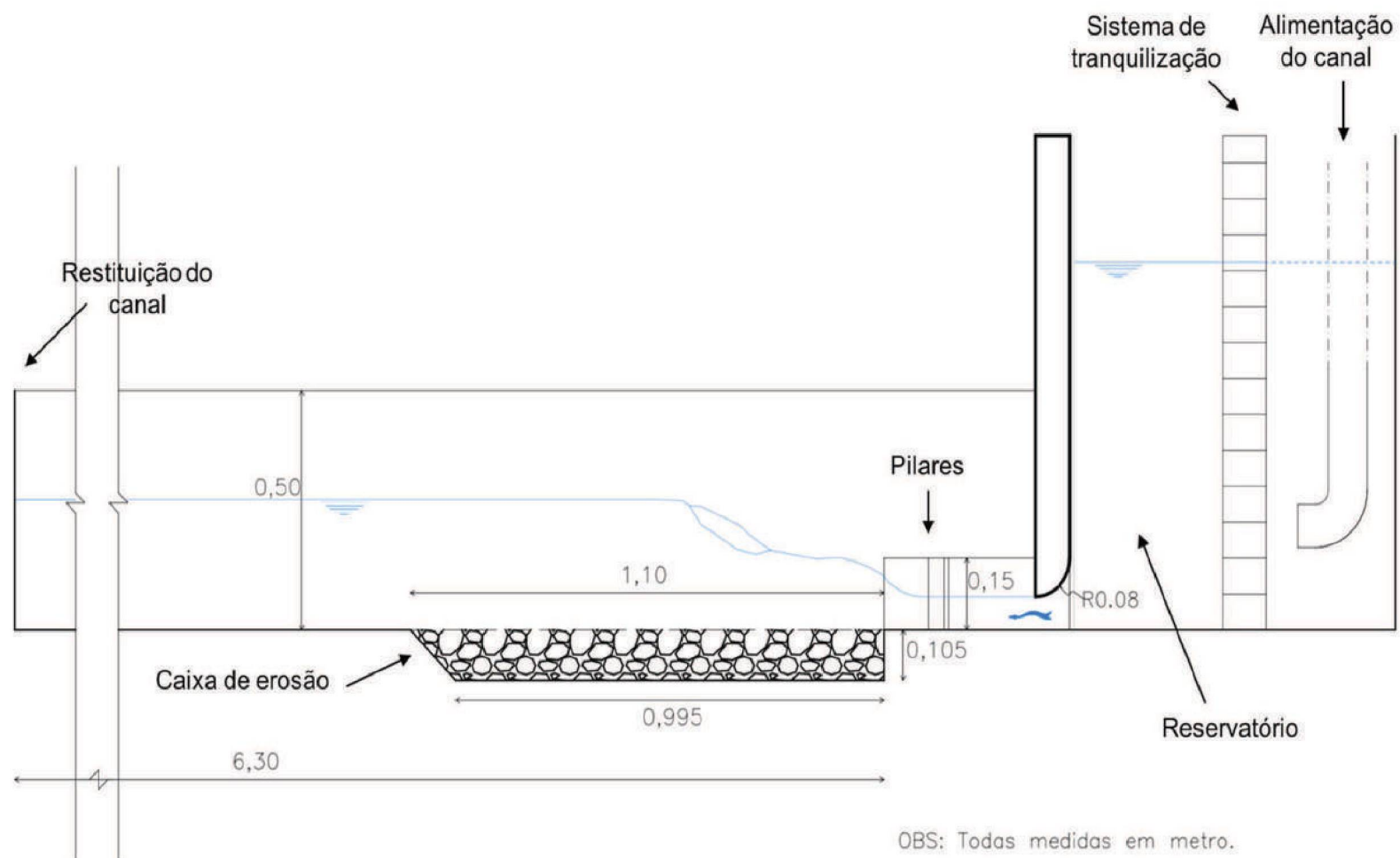


FIGURA 64 – PERFIL DO CANAL EXPERIMENTAL



## APÊNDICE B – PLANTA DAS ALTERNATIVAS

FIGURA 65 – PLANTA DA ALT. A ( $\eta = 1,00$ ;  $\theta = 0^\circ$ )

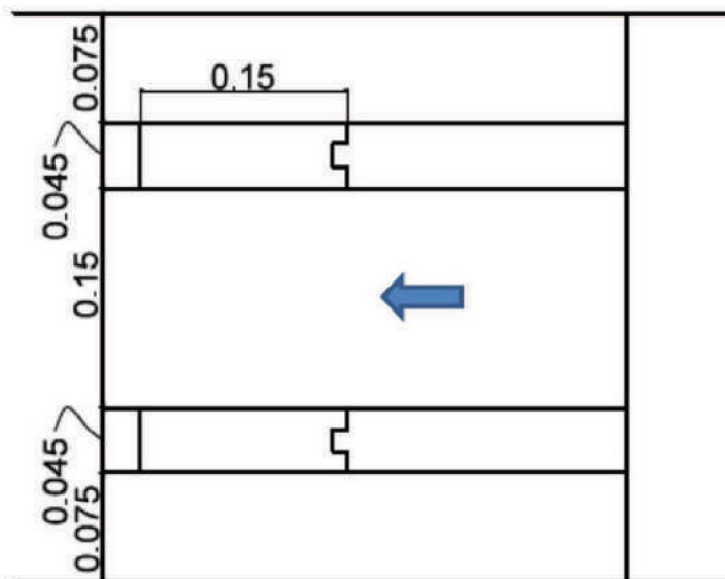


FIGURA 66 – PLANTA DA ALT. B ( $\eta = 0,40$ ;  $\theta = 15^\circ$ )

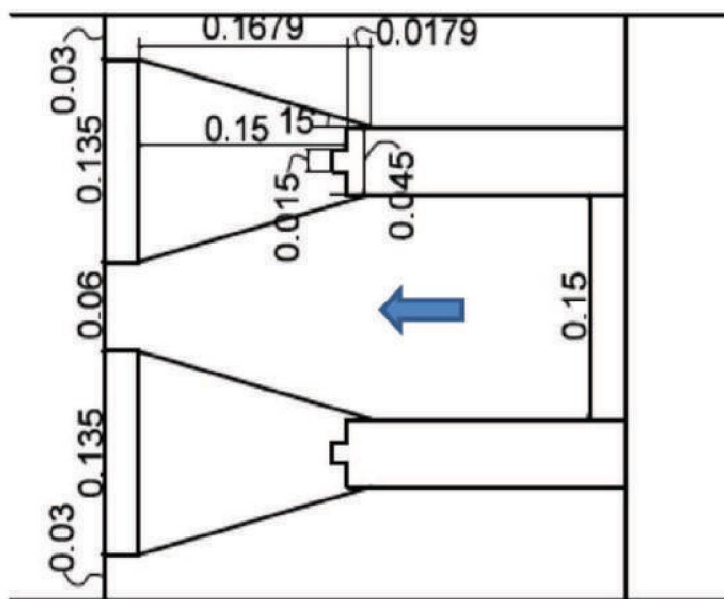
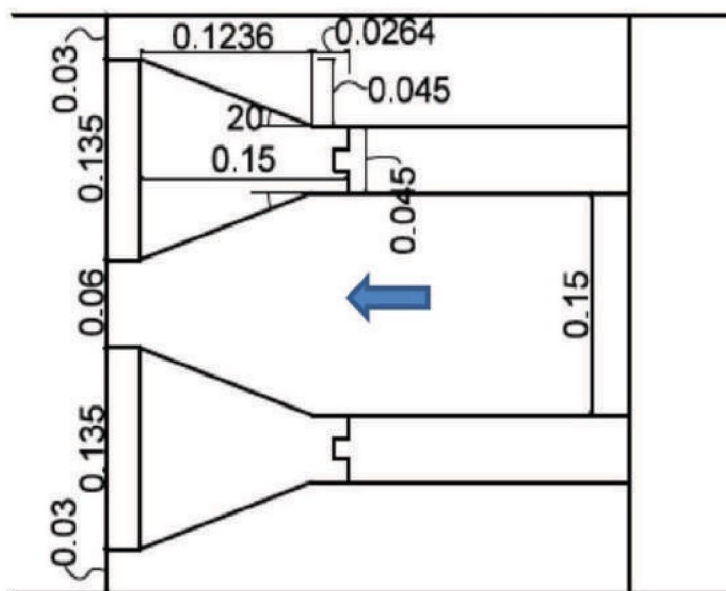
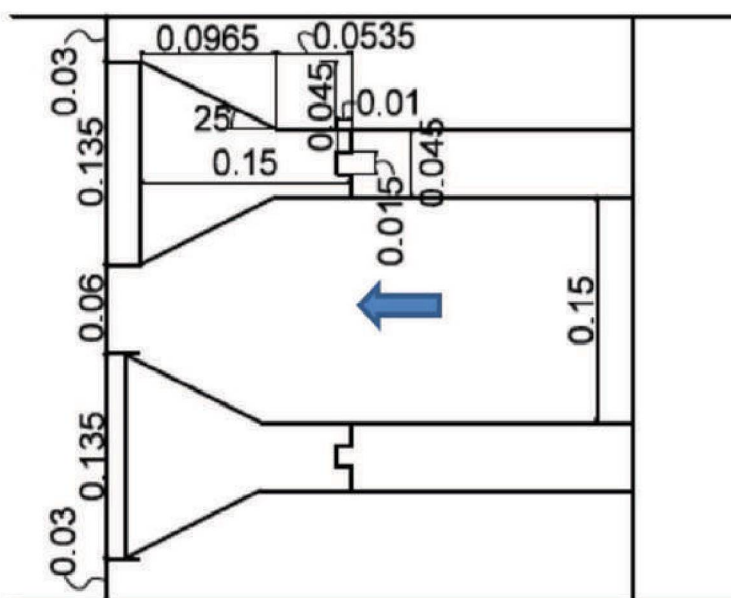




FIGURA 67 – PLANTA DA ALT. C ( $\eta = 0,40$ ;  $\theta = 20^\circ$ )FIGURA 68 – PLANTA DA ALT. D ( $\eta = 0,40$ ;  $\theta = 25^\circ$ )

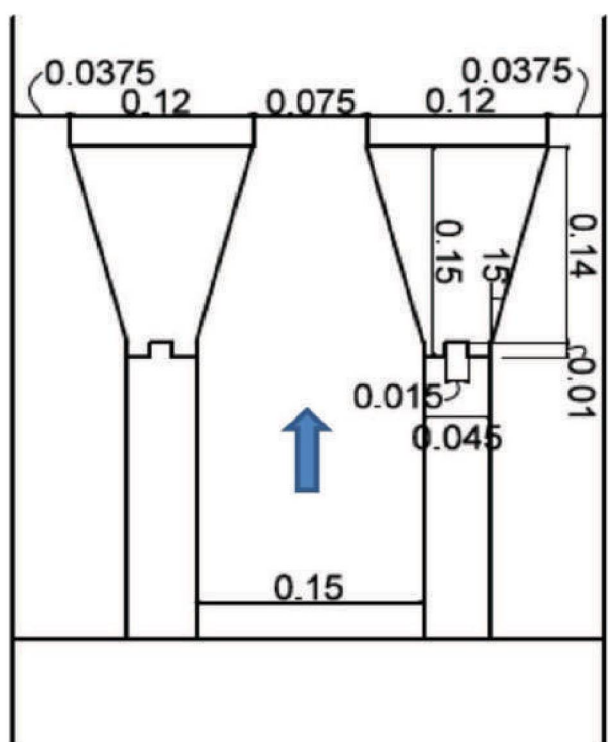
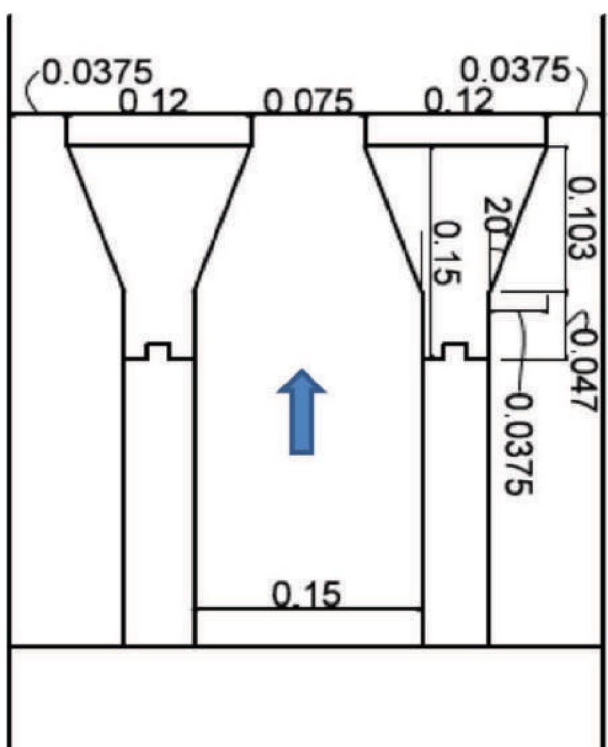


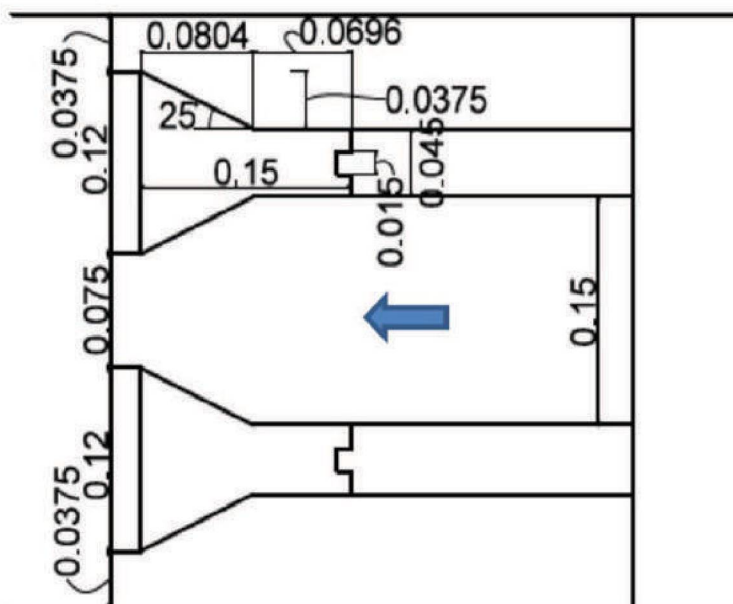
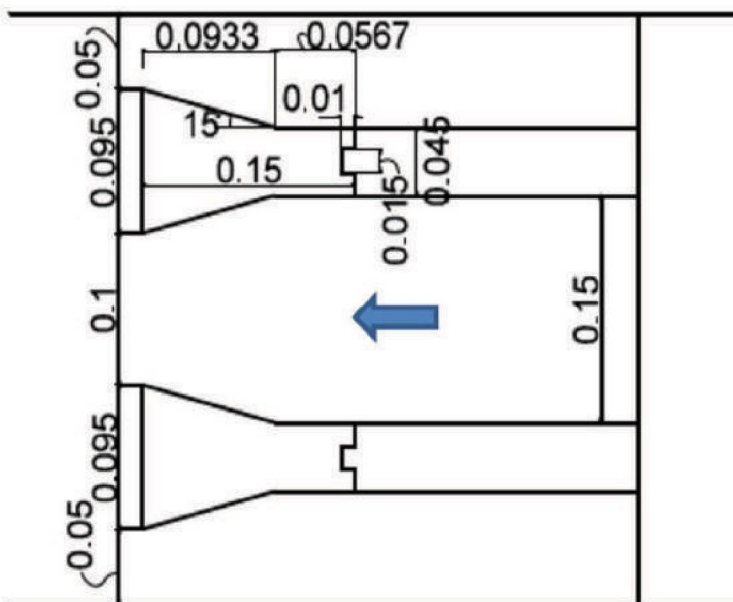
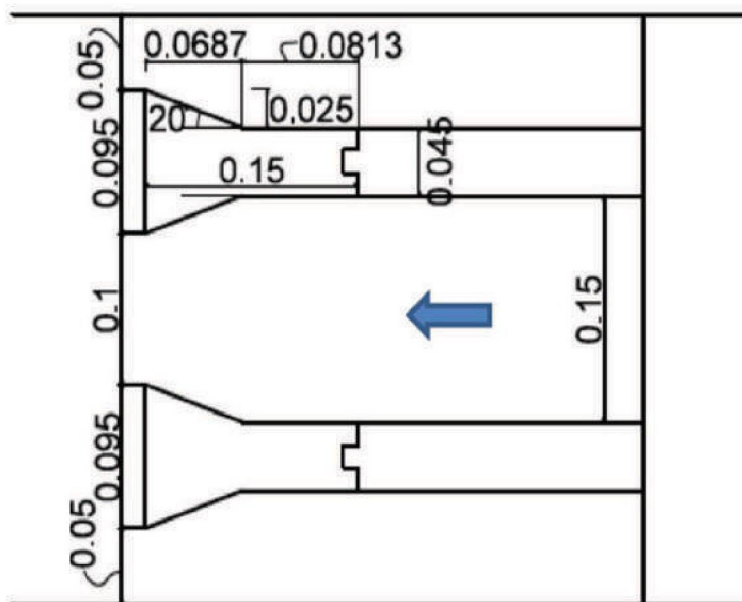
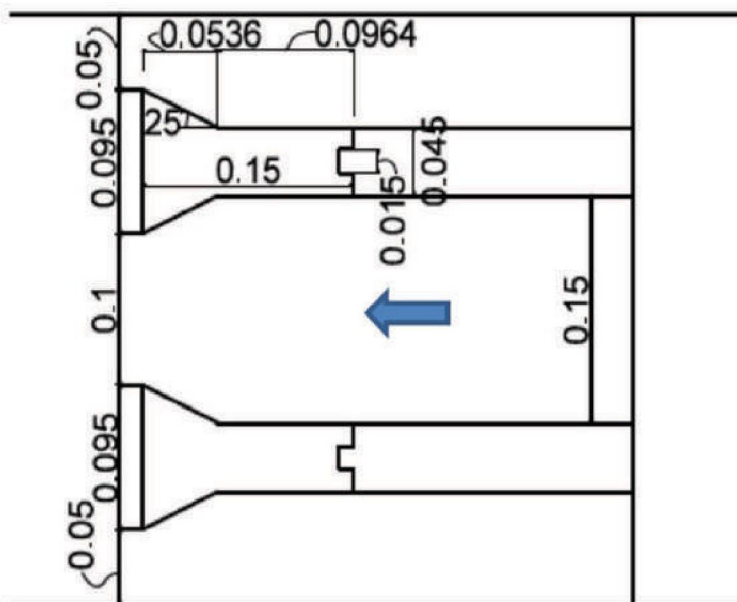
FIGURA 71 – PLANTA DA ALT. G ( $\eta = 0,50$ ;  $\theta = 25^\circ$ )FIGURA 72 – PLANTA DA ALT. H ( $\eta = 0,66$ ;  $\theta = 15^\circ$ )

FIGURA 73 – PLANTA DA ALT. I ( $\eta = 0,66$ ;  $\theta = 20^\circ$ )FIGURA 74 – PLANTA DA ALT. J ( $\eta = 0,66$ ;  $\theta = 25^\circ$ )



## APÊNDICE C – PADRÃO DO ESCOAMENTO DAS ALTERNATIVAS

FIGURA 75 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. A ( $\eta = 1,00$ ;  $\theta = 0^\circ$ )



FIGURA 76 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. B ( $\eta = 0,40$ ;  $\theta = 15^\circ$ )



FIGURA 77 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. C ( $\eta = 0,40$ ;  $\theta = 20^\circ$ )



FIGURA 78 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. D ( $\eta = 0,40$ ;  $\theta = 25^\circ$ )



FIGURA 79 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. E ( $\eta = 0,50$ ;  $\theta = 15^\circ$ )



FIGURA 80 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. F ( $\eta = 0,50$ ;  $\theta = 20^\circ$ )





FIGURA 81 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. G ( $\eta = 0,50$ ;  $\theta = 25^\circ$ )



FIGURA 82 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. H ( $\eta = 0,66$ ;  $\theta = 15^\circ$ )



FIGURA 83 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. I ( $\eta = 0,66$ ;  $\theta = 20^\circ$ )



FIGURA 84 – PADRÃO DO ESCOAMENTO DA ALT. J ( $\eta = 0,66$ ;  $\theta = 25^\circ$ )





## APÊNDICE D – COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO DE CADA ALTERNATIVA

### COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO DA ALTERNATIVA A

FIGURA 85 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. A ( $\eta = 1,00$ ;  $\theta = 0^\circ$ )

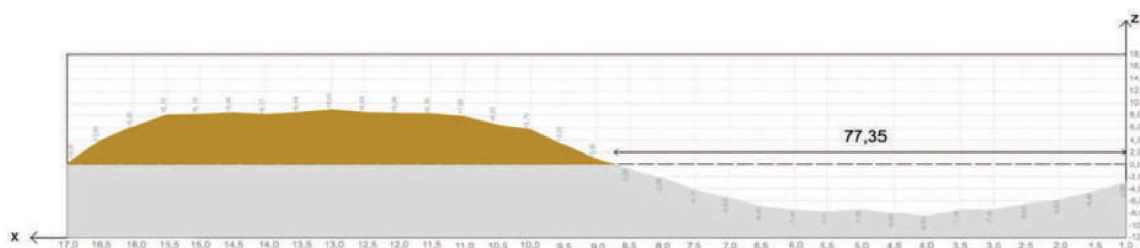


FIGURA 86 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. A ( $\eta = 1,00$ ;  $\theta = 0^\circ$ )



### COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO DA ALTERNATIVA B

FIGURA 87 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. B ( $\eta = 0,40$ ;  $\theta = 15^\circ$ )

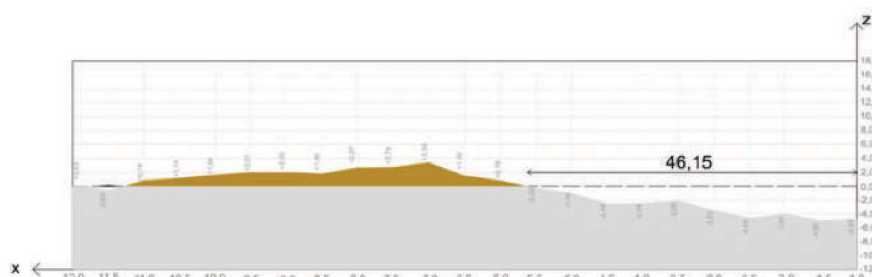


FIGURA 88 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. B ( $\eta = 0,40$ ;  $\theta = 15^\circ$ )



### COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO DA ALTERNATIVA C

FIGURA 89 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. C ( $\eta = 0,40$ ;  $\theta = 20^\circ$ )

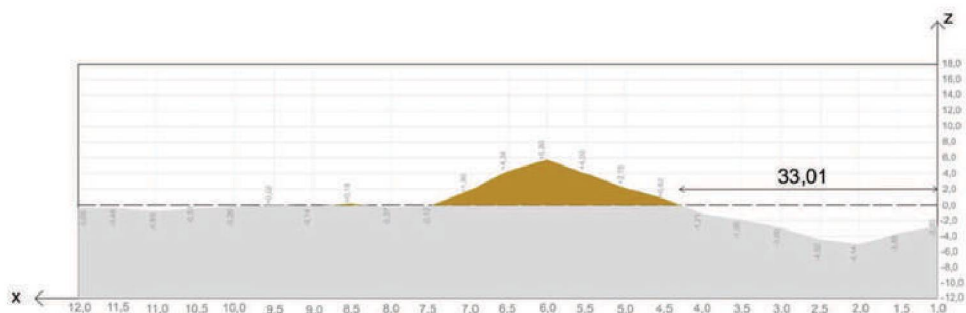


FIGURA 90 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. C ( $\eta = 0,40$ ;  $\theta = 20^\circ$ )



### COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO DA ALTERNATIVA D

FIGURA 91 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. D ( $\eta = 0,40$ ;  $\theta = 25^\circ$ )

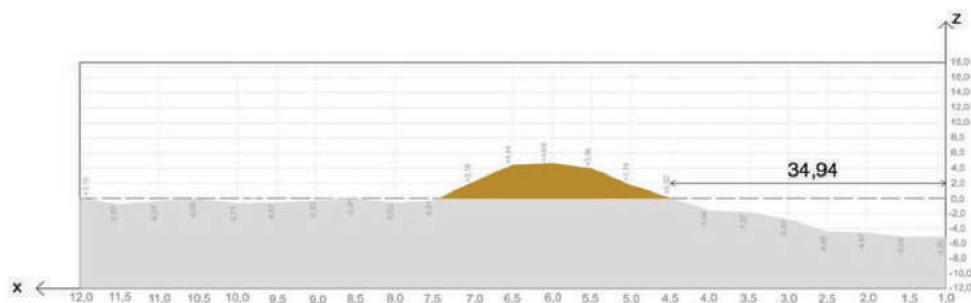


FIGURA 92 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. D ( $\eta = 0,40$ ;  $\theta = 25^\circ$ )



### COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO DA ALTERNATIVA E

FIGURA 93 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. E ( $\eta = 0,50$ ;  $\theta = 15^\circ$ )

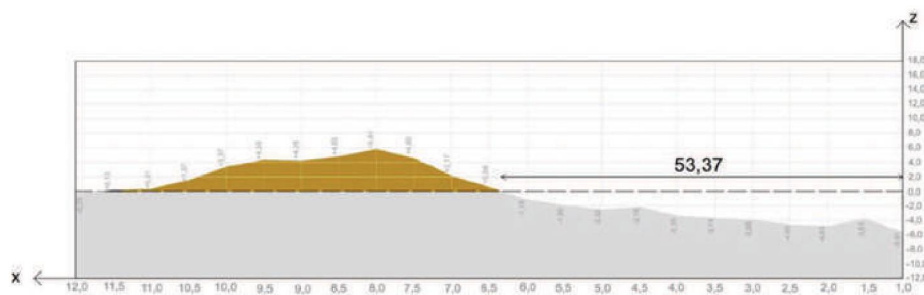


FIGURA 94 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. E ( $\eta = 0,50$ ;  $\theta = 15^\circ$ )



### COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO DA ALTERNATIVA F

FIGURA 95 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. F ( $\eta = 0,50$ ;  $\theta = 20^\circ$ )

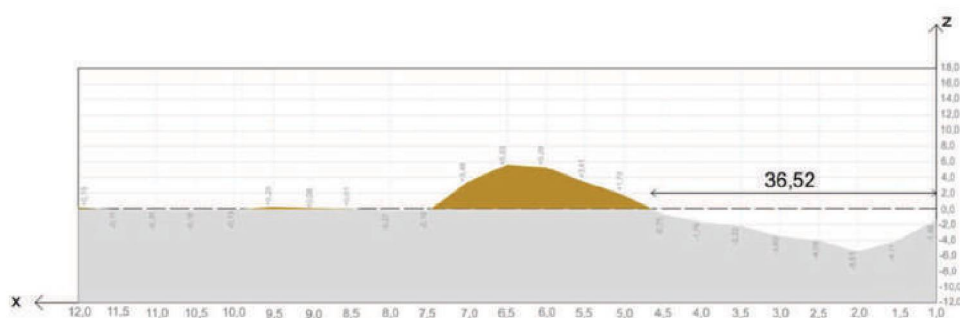
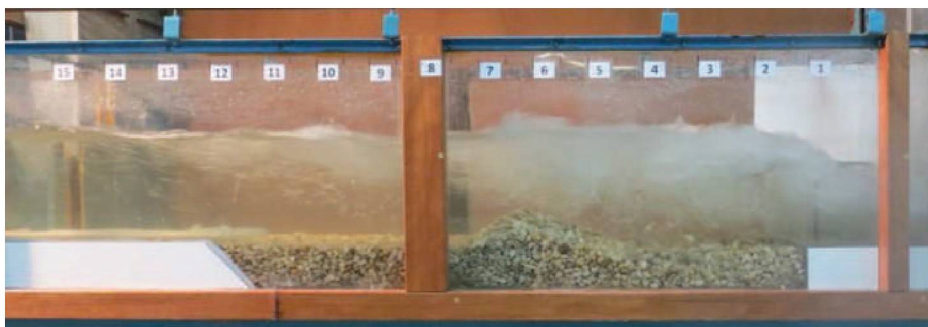


FIGURA 96 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. F ( $\eta = 0,50$ ;  $\theta = 20^\circ$ )



### COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO DA ALTERNATIVA G

FIGURA 97 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. G ( $\eta = 0,50$ ;  $\theta = 25^\circ$ )

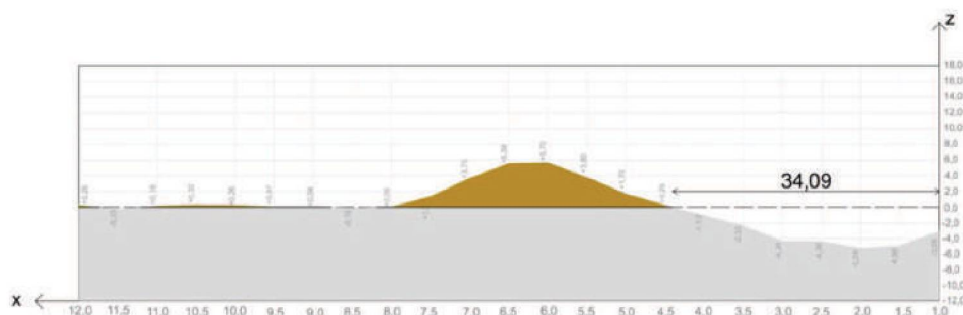


FIGURA 98 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. G ( $\eta = 0,50$ ;  $\theta = 25^\circ$ )



### COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO DA ALTERNATIVA H

FIGURA 99 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. H ( $\eta = 0,66$ ;  $\theta = 15^\circ$ )

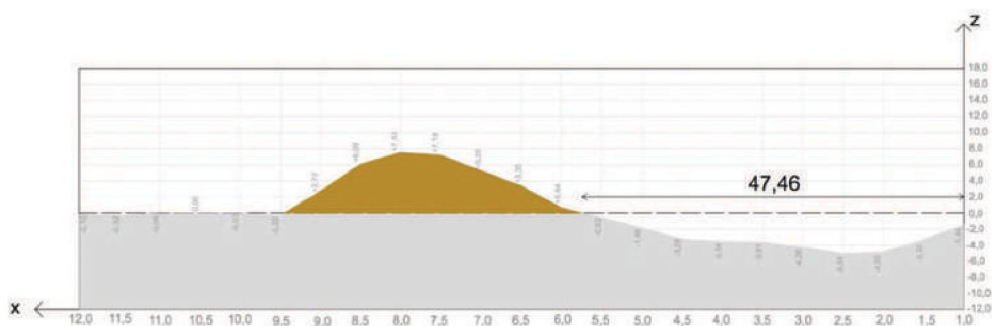


FIGURA 100 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. H ( $\eta = 0,66$ ;  $\theta = 15^\circ$ )





### COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO DA ALTERNATIVA I

FIGURA 101 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. I ( $\eta = 0,66$ ;  $\theta = 20^\circ$ )

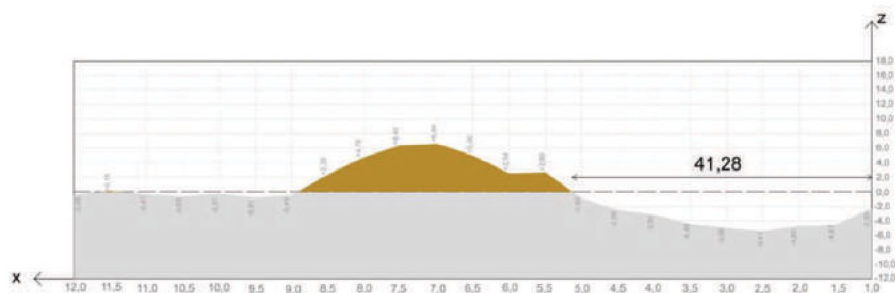


FIGURA 102 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. I ( $\eta = 0,66$ ;  $\theta = 20^\circ$ )



### COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO DA ALTERNATIVA J

FIGURA 103 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. J ( $\eta = 0,66$ ;  $\theta = 25^\circ$ )

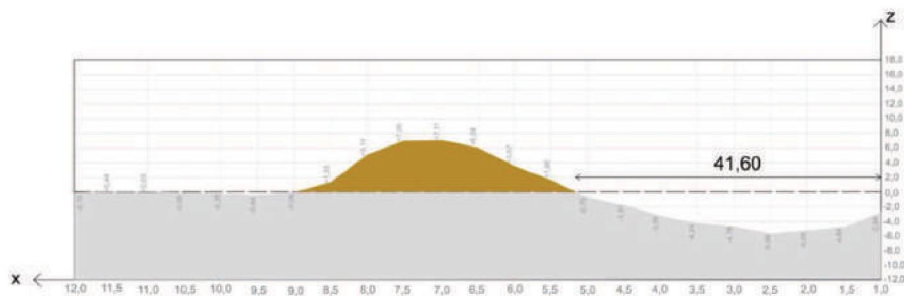


FIGURA 104 – RESSALTO HIDRÁULICO - ALT. J ( $\eta = 0,66$ ;  $\theta = 25^\circ$ )





## **APÊNDICE E – RESULTADOS BRUTOS DAS PROFUNDIDADES DAS FOSSAS DE EROÇÃO DAS ALTERNATIVAS**

Este apêndice apresenta as profundidades (z) medidas, em relação ao plano xy, para a caracterização da fossa de erosão formada em cada ensaio.

A malha referenciada ao canal experimental está ilustrada na Figura 44, apresentada na subseção 3.2.2.

Conforme descrito na seção 4.3.1, a referência foi fixada no topo da caixa de erosão (vide Figura 56). As profundidades de erosão possuem sentido negativo em relação ao referencial, e são apresentadas entre parênteses. As alturas da barra de material formada possuem sentido positivo. Todos os valores são apresentados em centímetros.

Adicionalmente, a malha foi colorida para melhor visualização da erosão/ barra, conforme legenda a seguir:

-  Profundidade de erosão
-  Altura da barra

## Alternativa A – Etapa I



	I	H	G	F	E	D	C	B	A	
1,00	(3,40)	(3,00)	(2,13)	(3,14)	(2,96)	(5,02)	(6,14)	(5,21)	(4,83)	1,00
1,50	(3,51)	(2,83)	(2,20)	(3,69)	(4,44)	(4,34)	(4,68)	(4,50)	(4,05)	1,50
2,00	(6,15)	(4,57)	(4,83)	(5,57)	(5,83)	(5,40)	(5,12)	(6,48)	(6,14)	2,00
2,50	(6,85)	(6,50)	(6,24)	(6,26)	(6,45)	(6,76)	(6,94)	(7,97)	(7,81)	2,50
3,00	(8,24)	(7,40)	(7,00)	(7,02)	(7,40)	(7,76)	(8,24)	(8,27)	(9,30)	3,00
3,50	(8,23)	(8,30)	(7,48)	(7,14)	(7,36)	(7,95)	(8,40)	(8,76)	(9,21)	3,50
4,00	(9,57)	(8,16)	(7,36)	(8,83)	(8,52)	(7,95)	(8,00)	(8,81)	(9,52)	4,00
4,50	(9,88)	(8,95)	(7,87)	(8,48)	(8,00)	(8,25)	(8,69)	(10,33)	(10,10)	4,50
5,00	(9,54)	(9,30)	(8,46)	(8,26)	(7,33)	(7,77)	(8,90)	(9,90)	(9,82)	5,00
5,50	(8,88)	(9,75)	(7,86)	(7,50)	(7,71)	(7,75)	(8,90)	(8,90)	(9,90)	5,50
6,00	(8,76)	(9,63)	(8,52)	(7,43)	(7,44)	(7,25)	(8,55)	(7,40)	(9,71)	6,00
6,50	(8,18)	(9,00)	(7,52)	(7,00)	(6,85)	(6,65)	(7,14)	(7,58)	(7,07)	6,50
7,00	(7,26)	(7,02)	(6,17)	(6,59)	(5,53)	(4,87)	(5,57)	(6,26)	(6,00)	7,00
7,50	(6,56)	(6,24)	(5,38)	(3,64)	(4,17)	(3,38)	(3,48)	(3,41)	(5,52)	7,50
8,00	(5,20)	(3,95)	(3,50)	(3,00)	(2,29)	(1,48)	(2,88)	(4,81)	(5,60)	8,00
8,50	(2,02)	(2,26)	(1,95)	(0,80)	(0,80)	(0,93)	(1,70)	(2,44)	(2,59)	8,50
9,00	0,14	(0,37)	0,10	0,95	0,90	1,64	(0,38)	(0,72)	(0,33)	9,00
9,50	3,24	2,98	2,89	3,20	3,25	3,44	3,58	2,62	3,17	9,50
10,00	6,36	5,98	6,25	6,00	5,70	5,29	5,01	4,84	5,33	10,00
10,50	8,47	8,12	7,98	7,43	6,50	7,37	7,55	6,60	6,36	10,50
11,00	8,79	9,04	8,80	8,02	7,85	7,44	8,10	7,52	7,79	11,00
11,50	8,50	8,79	8,97	8,94	8,30	7,95	7,86	8,31	8,81	11,50
12,00	8,40	8,98	8,74	8,60	8,36	7,62	8,24	8,13	8,71	12,00
12,50	8,28	8,55	8,43	8,48	8,48	7,43	8,55	8,33	8,77	12,50
13,00	8,13	8,32	8,79	8,37	9,05	7,93	8,86	8,43	8,48	13,00
13,50	7,89	8,36	9,00	8,12	8,48	8,48	8,68	8,37	8,45	13,50
14,00	7,55	7,67	7,68	8,29	8,17	8,40	8,80	8,60	8,79	14,00
14,50	7,12	7,36	7,79	8,24	8,45	8,55	8,36	8,93	8,66	14,50
15,00	6,06	7,17	7,24	7,98	8,19	8,62	8,24	8,50	8,24	15,00
15,50	4,54	3,64	7,08	7,93	8,10	7,40	6,25	6,70	6,53	15,50
16,00	3,66	4,72	5,09	6,26	6,20	4,56	5,20	5,23	4,91	16,00
16,50	2,84	3,25	3,80	4,30	3,95	3,65	4,20	3,88	3,21	16,50
17,00	1,66	1,01	0,18	0,90	0,20	0,18	0,90	1,17	1,06	17,00
	I	H	G	F	E	D	C	B	A	

## Alternativa A – Etapa II



	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	
1,00	(1,64)	(1,86)	(2,00)	(2,90)	(3,38)	(4,95)	(2,33)	(2,05)	(4,06)	1,00
1,50	(2,26)	(1,83)	(2,52)	(2,38)	(2,64)	(3,06)	(3,40)	(3,07)	(4,67)	1,50
2,00	(3,21)	(3,07)	(4,00)	(3,02)	(3,31)	(3,07)	(3,82)	(5,33)	(6,13)	2,00
2,50	(3,90)	(3,45)	(3,40)	(4,64)	(3,90)	(3,90)	(4,11)	(3,70)	(4,30)	2,50
3,00	(4,85)	(4,90)	(3,92)	(3,86)	(4,75)	(5,07)	(4,61)	(5,04)	(5,69)	3,00
3,50	(6,48)	(4,77)	(4,80)	(4,25)	(4,83)	(5,62)	(5,76)	(5,40)	(6,57)	3,50
4,00	(5,95)	(5,48)	(4,83)	(5,38)	(4,88)	(4,29)	(4,61)	(4,19)	(6,76)	4,00
4,50	(7,02)	(5,95)	(5,95)	(5,16)	(5,05)	(5,00)	(4,86)	(5,95)	(6,90)	4,50
5,00	(7,12)	(6,83)	(6,63)	(5,52)	(5,30)	(6,20)	(5,70)	(5,76)	(7,75)	5,00
5,50	(7,40)	(7,32)	(5,80)	(6,00)	(5,64)	(4,70)	(5,40)	(5,96)	(7,50)	5,50
6,00	(7,92)	(7,61)	(6,88)	(6,62)	(6,08)	(6,82)	(7,02)	(7,62)	(8,18)	6,00
6,50	(9,43)	(8,09)	(7,40)	(7,06)	(7,52)	(7,00)	(7,96)	(8,75)	(8,69)	6,50
7,00	(8,76)	(9,04)	(7,30)	(7,02)	(8,01)	(8,38)	(6,95)	(7,64)	(8,10)	7,00
7,50	(10,01)	(9,30)	(7,81)	(7,19)	(7,40)	(7,56)	(7,73)	(7,83)	(7,42)	7,50
8,00	(9,76)	(9,07)	(7,20)	(7,46)	(6,15)	(7,13)	(7,14)	(7,56)	(6,62)	8,00
8,50	(8,57)	(9,00)	(7,46)	(5,45)	(6,44)	(5,62)	(7,14)	(6,80)	(6,33)	8,50
9,00	(6,40)	(6,38)	(6,21)	(5,22)	(3,76)	(5,60)	(5,38)	(6,26)	(4,31)	9,00
9,50	(4,45)	(5,45)	(5,98)	(4,30)	(3,11)	(2,40)	(2,95)	(4,71)	(4,33)	9,50
10,00	(2,44)	(4,14)	(5,29)	(3,57)	(1,57)	(1,14)	(1,14)	(2,55)	(1,95)	10,00
10,50	(1,64)	(2,60)	(2,22)	(1,34)	0,10	0,05	(0,30)	(0,36)	(0,20)	10,50
11,00	0,15	(0,70)	0,69	0,24	0,44	0,70	0,89	0,52	0,01	11,00
11,50	1,40	1,12	1,10	1,17	0,36	0,00	(0,20)	0,36	0,18	11,50
12,00	1,74	0,44	1,00	0,81	(0,06)	(0,25)	0,20	(0,20)	(0,07)	12,00
	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	



## Alternativa B – Etapa I



	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	
1,00	(1,15)	(1,26)	(2,46)	(3,20)	(4,67)	(3,36)	(4,00)	(2,22)	(1,38)	1,00
1,50	(2,56)	(0,71)	(0,62)	(2,50)	(4,98)	(4,14)	(2,52)	(0,85)	(1,88)	1,50
2,00	(3,32)	(0,06)	(1,32)	(3,07)	(3,97)	(4,56)	(2,68)	(1,46)	(2,76)	2,00
2,50	(3,00)	(2,23)	(1,86)	(3,53)	(4,60)	(3,75)	(2,22)	(1,46)	(2,56)	2,50
3,00	(4,26)	(3,69)	(2,65)	(3,27)	(3,51)	(3,87)	(2,17)	(2,68)	(2,81)	3,00
3,50	(5,64)	(4,52)	(2,95)	(2,33)	(4,06)	(2,12)	(2,02)	(1,21)	(2,56)	3,50
4,00	(6,18)	(5,60)	(3,00)	(2,14)	(2,49)	(2,21)	(1,95)	(1,66)	(2,61)	4,00
4,50	(6,13)	(5,20)	(3,82)	(2,21)	(2,49)	(1,10)	(0,84)	(1,20)	(0,95)	4,50
5,00	(5,00)	(4,88)	(3,01)	(1,52)	(1,00)	(1,10)	0,06	0,54	(0,85)	5,00
5,50	(4,07)	(3,77)	(2,52)	(1,10)	(0,23)	0,60	1,62	1,40	1,21	5,50
6,00	(2,17)	(1,50)	(0,70)	(0,24)	0,78	1,78	3,00	1,86	1,80	6,00
6,50	(0,04)	0,25	1,36	1,67	1,50	2,98	3,71	4,50	3,98	6,50
7,00	0,93	1,85	0,75	2,32	3,38	3,20	4,48	4,76	4,50	7,00
7,50	0,95	1,26	2,17	1,89	2,74	3,93	4,15	4,74	4,93	7,50
8,00	1,32	1,30	1,50	1,70	2,67	3,75	2,93	3,56	4,38	8,00
8,50	0,50	0,72	1,55	1,74	1,80	1,93	2,13	2,56	2,98	8,50
9,00	1,17	1,00	2,19	1,40	2,05	2,02	2,05	2,42	2,12	9,00
9,50	0,08	1,15	2,14	1,70	2,01	1,94	1,01	2,12	1,71	9,50
10,00	(0,01)	0,57	0,19	1,07	1,64	1,19	1,70	2,14	1,24	10,00
10,50	(0,45)	(0,40)	0,32	0,94	1,14	0,56	1,08	0,79	0,18	10,50
11,00	(1,15)	(1,06)	0,13	(0,14)	0,79	0,74	(0,36)	0,30	(0,64)	11,00
11,50	(0,80)	(0,59)	(0,20)	0,05	(0,64)	(0,04)	(1,10)	(0,83)	(0,70)	11,50
12,00	(0,25)	(0,34)	(0,02)	(0,06)	0,43	(0,75)	(0,52)	(0,67)	(2,13)	12,00
	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	

## Alternativa B – Etapa II



	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	
1,00	(2,13)	(2,10)	(3,15)	(4,90)	(5,41)	(4,38)	(3,27)	(2,56)	(0,95)	1,00
1,50	(2,02)	(2,02)	(1,59)	(3,43)	(5,79)	(3,92)	(3,34)	(1,84)	(2,41)	1,50
2,00	(2,76)	(0,70)	(1,28)	(3,02)	(5,51)	(5,11)	(3,13)	(0,65)	(2,93)	2,00
2,50	(4,40)	(1,70)	(1,66)	(1,51)	(5,43)	(4,20)	(2,27)	(1,16)	(2,92)	2,50
3,00	(6,10)	(3,96)	(3,22)	(3,01)	(4,46)	(4,32)	(1,40)	(1,61)	(2,24)	3,00
3,50	(7,33)	(5,33)	(3,38)	(3,50)	(4,48)	(2,94)	(2,00)	(1,06)	(1,82)	3,50
4,00	(7,10)	(5,66)	(4,62)	(3,36)	(2,88)	(2,17)	(2,32)	(1,65)	(2,40)	4,00
4,50	(6,76)	(6,00)	(5,00)	(3,02)	(2,90)	(2,39)	(1,96)	(1,30)	(1,55)	4,50
5,00	(6,17)	(6,22)	(4,38)	(3,28)	(2,27)	(1,58)	(1,82)	(0,80)	(0,76)	5,00
5,50	(4,65)	(5,22)	(4,10)	(2,36)	(1,44)	(1,88)	(1,89)	(0,85)	(1,56)	5,50
6,00	(4,56)	(4,40)	(2,88)	(2,32)	(1,72)	(1,46)	(0,77)	(0,21)	(1,21)	6,00
6,50	(4,10)	(3,57)	(2,42)	(1,47)	(0,86)	(0,59)	(0,41)	1,55	0,28	6,50
7,00	(2,17)	(1,80)	(1,60)	(1,14)	(0,38)	(0,18)	0,75	2,78	0,88	7,00
7,50	(1,49)	(0,70)	(0,89)	(1,03)	0,61	1,22	2,33	3,59	2,55	7,50
8,00	(0,89)	(0,93)	(0,09)	0,79	1,48	3,24	3,57	4,04	3,20	8,00
8,50	(0,53)	(0,88)	0,67	0,67	1,87	3,25	3,25	4,00	3,44	8,50
9,00	(1,38)	(1,51)	0,51	0,92	2,00	2,13	2,50	2,38	3,19	9,00
9,50	(1,00)	(0,81)	(0,55)	0,94	1,32	0,87	1,35	1,25	1,91	9,50
10,00	(1,45)	0,79	(0,51)	(0,19)	0,32	0,37	0,65	1,09	0,62	10,00
10,50	(1,70)	(0,54)	(0,43)	(0,25)	0,00	0,30	0,38	0,02	(0,76)	10,50
11,00	(0,90)	(0,81)	0,26	0,24	0,52	0,04	(1,00)	(0,09)	(0,91)	11,00
11,50	(1,20)	(0,90)	(0,10)	(0,03)	(0,39)	0,02	(0,09)	(0,51)	(1,49)	11,50
12,00	(0,11)	(1,30)	0,31	(0,07)	0,00	0,03	0,00	(0,39)	(0,65)	12,00
	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	

## Alternativa C – Etapa I



	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	
1,00	(1,33)	(0,64)	(0,88)	(1,54)	(2,80)	(3,90)	(1,32)	(0,25)	(0,33)	1,00
1,50	(2,61)	(1,72)	(0,45)	(1,70)	(3,66)	(3,66)	(1,33)	(1,18)	(2,79)	1,50
2,00	(4,65)	(2,20)	(1,64)	(2,75)	(5,14)	(5,14)	(2,00)	(1,57)	(3,88)	2,00
2,50	(4,06)	(2,33)	(2,57)	(2,76)	(4,50)	(4,50)	(2,13)	(2,25)	(3,20)	2,50
3,00	(3,75)	(3,14)	(2,71)	(2,06)	(3,00)	(3,00)	(1,40)	(2,62)	(2,69)	3,00
3,50	(4,36)	(3,00)	(1,99)	(2,20)	(1,95)	(1,95)	(1,02)	(1,92)	(1,80)	3,50
4,00	(3,81)	(2,81)	(1,96)	(1,13)	(1,21)	(1,21)	(1,06)	(1,53)	(1,51)	4,00
4,50	(2,57)	(2,40)	0,00	0,16	0,80	0,80	0,67	0,05	(0,50)	4,50
5,00	(0,45)	0,38	2,36	1,48	2,16	2,16	1,86	1,70	0,86	5,00
5,50	0,70	2,39	2,90	3,67	4,00	4,00	4,30	3,65	2,36	5,50
6,00	1,24	2,86	4,18	4,56	5,80	5,80	4,55	4,48	4,08	6,00
6,50	0,76	1,94	3,67	4,38	4,34	4,34	3,87	2,98	2,69	6,50
7,00	(0,07)	(0,33)	0,10	1,37	1,80	1,80	0,86	1,12	0,05	7,00
7,50	0,48	(0,30)	(0,20)	(0,22)	(0,12)	(0,12)	(0,06)	(0,50)	(0,20)	7,50
8,00	0,00	(0,07)	(0,45)	(0,76)	(0,37)	(0,37)	(0,55)	(0,52)	(0,07)	8,00
8,50	0,10	(0,25)	(0,14)	(0,21)	0,18	0,18	(0,67)	(0,26)	(0,49)	8,50
9,00	(0,11)	(0,26)	(0,42)	0,14	(0,14)	(0,14)	(0,12)	(0,40)	(0,54)	9,00
9,50	(0,45)	(1,00)	(0,17)	0,65	0,02	0,02	(0,26)	(0,64)	(0,49)	9,50
10,00	(0,33)	(0,21)	(0,45)	(0,07)	(0,26)	(0,26)	(0,40)	0,00	(0,13)	10,00
10,50	(0,07)	0,00	(0,21)	(0,07)	(0,53)	(0,53)	(0,61)	(0,43)	(0,52)	10,50
11,00	(0,07)	(0,30)	(0,26)	(0,10)	(0,83)	(0,83)	(0,30)	0,10	0,16	11,00
11,50	0,63	(0,52)	0,00	(0,46)	(0,48)	(0,48)	(0,33)	(0,12)	0,33	11,50
12,00	0,17	(0,14)	(0,10)	(0,19)	(0,45)	(0,45)	(0,35)	(0,05)	0,29	12,00
	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	

## Alternativa C – Etapa II



	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	
1,00	(1,76)	(1,10)	(0,82)	(1,65)	(3,80)	(3,00)	(1,78)	(0,75)	(0,45)	1,00
1,50	(4,42)	(1,34)	(1,19)	(3,09)	(4,06)	(3,86)	(1,27)	(0,95)	(2,88)	1,50
2,00	(4,41)	(1,76)	(1,60)	(3,11)	(5,65)	(3,98)	(0,82)	(1,99)	(3,12)	2,00
2,50	(5,10)	(2,52)	(3,01)	(4,07)	(4,14)	(3,95)	(1,88)	(2,38)	(3,21)	2,50
3,00	(5,14)	(4,30)	(3,19)	(2,70)	(3,45)	(3,00)	(1,52)	(2,90)	(2,62)	3,00
3,50	(5,33)	(4,52)	(3,25)	(2,01)	(2,64)	(1,82)	(2,30)	(2,45)	(3,07)	3,50
4,00	(5,76)	(4,01)	(2,52)	(1,50)	(1,23)	(1,45)	(1,60)	(1,86)	(2,02)	4,00
4,50	(3,90)	(3,17)	(0,46)	(1,07)	(0,40)	(0,71)	(0,50)	0,10	(0,45)	4,50
5,00	(2,02)	(1,76)	(0,52)	0,58	0,30	1,38	0,75	0,00	0,36	5,00
5,50	0,67	1,12	0,79	2,17	2,29	2,37	1,20	1,55	0,55	5,50
6,00	0,25	0,79	1,93	2,78	3,39	3,16	1,67	2,05	0,62	6,00
6,50	0,86	(0,06)	1,17	1,43	2,36	1,67	0,60	0,55	0,43	6,50
7,00	0,11	(0,30)	0,38	1,26	0,79	0,86	0,48	0,55	0,31	7,00
7,50	0,40	(0,45)	0,36	(1,13)	0,12	0,05	0,40	0,12	0,24	7,50
8,00	0,00	(0,14)	(0,50)	(0,24)	(0,56)	(0,14)	(0,07)	(0,36)	(0,07)	8,00
8,50	0,06	0,05	(0,71)	(0,25)	0,09	(0,80)	(0,40)	0,10	(0,13)	8,50
9,00	(0,16)	0,43	(0,70)	(0,14)	(0,06)	0,08	(1,02)	(0,10)	(0,33)	9,00
9,50	(0,14)	(1,06)	(0,38)	(0,40)	(0,40)	(0,21)	(0,33)	(0,26)	(0,27)	9,50
10,00	(0,38)	(0,40)	(0,14)	(0,21)	(0,10)	(0,03)	(0,26)	0,19	(0,07)	10,00
10,50	0,00	(0,07)	(0,80)	(0,25)	(0,49)	(0,40)	(0,76)	0,03	(0,46)	10,50
11,00	(0,52)	(0,40)	(0,35)	(0,40)	(0,36)	(0,32)	(0,20)	(0,33)	0,04	11,00
11,50	(0,25)	(0,53)	(0,36)	(0,57)	(0,45)	(0,30)	(0,02)	(0,26)	(0,06)	11,50
12,00	(0,33)	(0,14)	(0,62)	(0,45)	(0,58)	(0,21)	(0,64)	(1,06)	(0,08)	12,00
	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	



## Alternativa D – Etapa I



	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	
1,00	(1,82)	(2,00)	(1,88)	(3,07)	(5,20)	(3,50)	(2,38)	(2,24)	(2,12)	1,00
1,50	(4,05)	(1,33)	(1,90)	(3,32)	(5,24)	(3,79)	(1,60)	(1,57)	(3,49)	1,50
2,00	(4,70)	(2,17)	(2,05)	(4,04)	(4,57)	(2,14)	(2,11)	(2,66)	(3,34)	2,00
2,50	(4,10)	(2,57)	(1,95)	(3,82)	(4,45)	(3,18)	(3,14)	(3,11)	(2,92)	2,50
3,00	(2,76)	(1,88)	(2,72)	(3,03)	(2,81)	(3,54)	(1,75)	(2,29)	(2,82)	3,00
3,50	(2,71)	(2,22)	(2,33)	(1,12)	(1,87)	(2,07)	(1,37)	(1,00)	(1,80)	3,50
4,00	(2,14)	(2,52)	(0,70)	(1,60)	(1,66)	(0,70)	(1,25)	(0,93)	(1,49)	4,00
4,50	(1,67)	(0,82)	0,29	0,60	0,02	(0,63)	0,80	(0,13)	0,54	4,50
5,00	0,43	1,01	1,48	1,93	1,74	1,92	2,10	1,79	0,60	5,00
5,50	2,36	2,28	3,43	3,74	3,96	4,32	3,93	3,63	3,16	5,50
6,00	2,29	2,60	3,87	4,48	4,69	4,93	4,24	4,79	4,62	6,00
6,50	1,06	2,38	3,11	4,78	4,44	4,04	4,93	3,46	3,30	6,50
7,00	(0,02)	1,24	2,30	1,60	2,18	3,11	1,24	0,10	0,38	7,00
7,50	(0,02)	(0,38)	(0,30)	(0,56)	(0,31)	(0,10)	(0,44)	0,00	(0,18)	7,50
8,00	0,14	(0,76)	(0,54)	(0,65)	(0,62)	(0,21)	(0,48)	0,05	0,10	8,00
8,50	(0,12)	(0,50)	(0,32)	(0,14)	(0,07)	(0,44)	(0,34)	(0,90)	(0,15)	8,50
9,00	(0,40)	(0,08)	(0,48)	(0,62)	(0,33)	(0,46)	0,10	(1,00)	0,15	9,00
9,50	(0,20)	(0,58)	(0,10)	(0,66)	(0,57)	(0,11)	0,00	(0,56)	0,01	9,50
10,00	(0,45)	(0,15)	(0,85)	(0,45)	(0,71)	(0,64)	(0,14)	(0,20)	0,02	10,00
10,50	(0,50)	(0,28)	(0,12)	(0,29)	(0,05)	(0,34)	(0,21)	(0,30)	(0,12)	10,50
11,00	(0,06)	(0,14)	(0,48)	(0,50)	(0,37)	(0,43)	0,06	(0,10)	0,06	11,00
11,50	(0,43)	(0,25)	0,02	(0,34)	(0,87)	0,20	(0,01)	0,16	0,07	11,50
12,00	(0,14)	(0,30)	0,05	(0,26)	0,10	(0,50)	0,21	0,48	0,14	12,00
	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	

## Alternativa D – Etapa II



	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	
1,00	(1,35)	(1,06)	(0,96)	(3,39)	(3,78)	(4,44)	(2,38)	(1,78)	(2,30)	1,00
1,50	(3,42)	(1,69)	(2,12)	(3,86)	(5,45)	(3,15)	(1,86)	(1,35)	(3,62)	1,50
2,00	(4,20)	(2,41)	(2,54)	(3,09)	(4,76)	(4,02)	(2,77)	(2,35)	(4,12)	2,00
2,50	(5,21)	(2,58)	(2,79)	(3,56)	(4,56)	(4,00)	(2,45)	(2,71)	(4,02)	2,50
3,00	(5,12)	(4,65)	(3,32)	(2,86)	(3,40)	(2,69)	(2,31)	(2,12)	(2,59)	3,00
3,50	(4,58)	(4,00)	(2,61)	(2,26)	(2,50)	(2,16)	(1,80)	(2,22)	(2,20)	3,50
4,00	(4,18)	(3,70)	(1,80)	(1,36)	(1,52)	(0,78)	(1,04)	(1,55)	(2,38)	4,00
4,50	(3,15)	(2,46)	(0,50)	(0,15)	0,50	(0,17)	(0,20)	(0,59)	(1,43)	4,50
5,00	(2,20)	(1,28)	0,31	0,80	1,09	1,47	1,74	0,69	(0,66)	5,00
5,50	(0,68)	(0,24)	1,34	2,17	2,20	2,75	2,85	2,00	1,07	5,50
6,00	(0,36)	(0,05)	0,52	2,70	2,29	2,34	1,37	1,74	1,66	6,00
6,50	(0,18)	(0,20)	(0,17)	0,67	0,84	0,86	0,82	0,52	0,65	6,50
7,00	(0,39)	(0,70)	(0,50)	(0,80)	0,43	0,00	(0,58)	0,00	(0,10)	7,00
7,50	(0,28)	(0,12)	(0,18)	(0,57)	(0,10)	(0,47)	(0,05)	0,08	(0,04)	7,50
8,00	(0,22)	(0,50)	(0,81)	(0,90)	(0,66)	0,00	(0,68)	(0,02)	0,08	8,00
8,50	(0,05)	(0,20)	(0,38)	(0,20)	(0,76)	(0,48)	(0,10)	(0,33)	(0,30)	8,50
9,00	(0,88)	(0,09)	(0,41)	(0,68)	(0,33)	(0,01)	(0,42)	(0,10)	(0,19)	9,00
9,50	(0,28)	(0,28)	(0,10)	(0,82)	(0,65)	(0,72)	(0,03)	(0,72)	(0,21)	9,50
10,00	(0,62)	0,09	(0,48)	(0,56)	0,01	(0,22)	(0,10)	(0,02)	0,26	10,00
10,50	(0,40)	(0,12)	(0,01)	(0,27)	(0,07)	(0,18)	(0,41)	(0,08)	(0,36)	10,50
11,00	0,04	(0,08)	(0,04)	0,10	(0,92)	(0,31)	(0,02)	(0,18)	(0,20)	11,00
11,50	(0,55)	(0,15)	(0,08)	(0,20)	0,25	(0,01)	0,20	(0,06)	0,22	11,50
12,00	(0,23)	(0,11)	(0,50)	(0,30)	(0,09)	(0,02)	0,28	(0,16)	0,35	12,00
	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	

## Alternativa E – Etapa I



	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	
1,00	(1,96)	(1,95)	(3,33)	(5,34)	(5,61)	(4,47)	(2,71)	(1,87)	(1,98)	1,00
1,50	(2,77)	(2,32)	(2,47)	(3,52)	(3,81)	(4,09)	(2,82)	(1,88)	(2,61)	1,50
2,00	(2,78)	(0,94)	(0,88)	(2,85)	(4,83)	(4,48)	(1,72)	(1,25)	(2,79)	2,00
2,50	(3,96)	(3,05)	(1,26)	(3,88)	(4,60)	(3,85)	(2,31)	(1,83)	(2,81)	2,50
3,00	(4,94)	(3,93)	(2,82)	(3,44)	(3,98)	(3,31)	(2,85)	(1,24)	(2,71)	3,00
3,50	(6,18)	(5,14)	(4,34)	(3,36)	(3,74)	(3,94)	(3,10)	(1,09)	(1,64)	3,50
4,00	(6,55)	(5,82)	(4,25)	(3,10)	(3,35)	(3,06)	(2,56)	(1,83)	(2,08)	4,00
4,50	(6,23)	(5,34)	(4,10)	(2,83)	(2,16)	(2,60)	(2,01)	(1,65)	(1,45)	4,50
5,00	(6,60)	(5,37)	(4,31)	(2,65)	(2,52)	(2,65)	(1,38)	(0,94)	(1,92)	5,00
5,50	(5,75)	(3,93)	(3,20)	(1,65)	(1,95)	(1,94)	(0,81)	(0,50)	(1,15)	5,50
6,00	(3,94)	(4,10)	(2,21)	(0,06)	(1,16)	(0,41)	0,14	1,20	0,03	6,00
6,50	(1,88)	(2,16)	(0,20)	1,89	0,56	1,48	2,12	1,75	1,44	6,50
7,00	0,29	(0,39)	0,93	3,12	2,17	3,56	3,85	4,15	2,92	7,00
7,50	2,00	2,13	2,53	3,47	4,60	5,58	5,67	5,08	4,95	7,50
8,00	2,77	2,63	2,87	3,54	5,81	5,90	5,79	6,09	5,80	8,00
8,50	2,97	3,05	3,81	4,06	4,83	5,78	6,41	6,00	6,42	8,50
9,00	2,59	2,75	3,48	4,36	4,26	5,06	5,39	6,18	6,16	9,00
9,50	2,08	3,64	3,24	2,63	4,39	4,54	5,19	5,63	4,88	9,50
10,00	0,81	1,94	2,70	2,54	3,37	3,40	3,96	4,08	2,74	10,00
10,50	(0,57)	0,52	1,27	0,49	1,57	1,93	2,09	2,05	1,45	10,50
11,00	(0,26)	(0,66)	(0,18)	0,09	0,31	0,79	0,54	0,50	0,01	11,00
11,50	(0,84)	(0,62)	0,13	(0,05)	0,13	0,25	0,57	0,00	(0,27)	11,50
12,00	(0,17)	(0,24)	(0,05)	(0,18)	(0,25)	0,01	(0,16)	(0,20)	(0,28)	12,00
	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	

## Alternativa E – Etapa II



	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	
1,00	(1,56)	(1,13)	(1,98)	(4,50)	(4,50)	(3,20)	(2,61)	(1,91)	(2,76)	1,00
1,50	(2,66)	(1,33)	(1,20)	(3,20)	(4,38)	(3,74)	(2,64)	(1,29)	(2,06)	1,50
2,00	(3,28)	(2,20)	(1,64)	(3,49)	(4,96)	(4,86)	(2,06)	(1,23)	(2,50)	2,00
2,50	(5,57)	(4,74)	(3,69)	(4,15)	(4,83)	(4,78)	(3,46)	(0,84)	(3,75)	2,50
3,00	(7,40)	(6,41)	(4,28)	(3,30)	(4,48)	(4,31)	(3,03)	(1,73)	(2,64)	3,00
3,50	(7,66)	(7,20)	(5,27)	(3,55)	(4,42)	(3,84)	(2,98)	(1,30)	(2,42)	3,50
4,00	(8,06)	(7,92)	(5,95)	(4,26)	(3,21)	(3,77)	(2,56)	(1,75)	(1,52)	4,00
4,50	(7,88)	(7,42)	(5,86)	(4,46)	(3,41)	(2,91)	(2,52)	(1,65)	(1,76)	4,50
5,00	(6,55)	(6,90)	(5,36)	(3,82)	(2,55)	(3,16)	(1,75)	(1,63)	(1,88)	5,00
5,50	(6,36)	(6,81)	(4,05)	(3,64)	(3,22)	(2,40)	(1,01)	(1,18)	(1,82)	5,50
6,00	(4,95)	(5,34)	(3,49)	(2,43)	(2,54)	(1,56)	(0,82)	(0,18)	(0,38)	6,00
6,50	(3,17)	(3,81)	(2,40)	(1,64)	(0,05)	(0,42)	0,38	1,25	(0,12)	6,50
7,00	(1,94)	(2,30)	(1,99)	(0,60)	0,38	1,59	2,75	2,38	1,54	7,00
7,50	(0,89)	(0,35)	(0,22)	0,21	1,94	3,20	3,59	3,41	3,16	7,50
8,00	(0,47)	(0,20)	(0,50)	0,10	1,63	3,12	4,19	4,03	3,70	8,00
8,50	(0,48)	0,26	(0,57)	(0,67)	0,17	2,36	3,63	4,00	4,35	8,50
9,00	(0,56)	(0,51)	0,54	0,04	0,05	1,37	2,48	3,35	3,00	9,00
9,50	(0,78)	(0,41)	(0,07)	(0,36)	0,63	0,24	1,41	1,86	1,62	9,50
10,00	(0,43)	0,33	(0,16)	(0,70)	0,07	0,48	0,34	0,94	0,86	10,00
10,50	(0,56)	(0,31)	0,25	(0,14)	0,42	(0,11)	(0,08)	0,24	0,28	10,50
11,00	(0,69)	(0,41)	(0,31)	0,09	0,00	0,14	0,20	0,04	0,03	11,00
11,50	(0,88)	(0,24)	(0,07)	(0,02)	0,15	(0,11)	0,23	(0,05)	(0,27)	11,50
12,00	(0,61)	(0,30)	(0,26)	(0,25)	0,73	0,35	(0,07)	(0,28)	(0,40)	12,00
	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	



## Alternativa F – Etapa I



	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	
1,00	(1,23)	(0,52)	0,06	(1,68)	(1,46)	(1,64)	0,21	(0,45)	(1,07)	1,00
1,50	(3,02)	(0,85)	(0,45)	(3,28)	(4,11)	(2,58)	(0,36)	(0,58)	(3,40)	1,50
2,00	(4,36)	(1,80)	(2,08)	(3,92)	(5,51)	(4,06)	(1,04)	(1,68)	(4,23)	2,00
2,50	(4,10)	(3,24)	(2,18)	(3,14)	(4,09)	(3,08)	(2,58)	(2,26)	(3,42)	2,50
3,00	(4,37)	(2,85)	(2,19)	(3,20)	(3,60)	(2,86)	(2,10)	(2,43)	(3,13)	3,00
3,50	(4,52)	(3,36)	(2,61)	(2,56)	(2,22)	(1,78)	(1,73)	(1,69)	(2,31)	3,50
4,00	(3,41)	(2,63)	(2,48)	(1,53)	(1,76)	(1,42)	(0,82)	(1,85)	(2,37)	4,00
4,50	(2,31)	(1,56)	(0,13)	(0,14)	(0,75)	(0,10)	0,43	(1,00)	(1,16)	4,50
5,00	(0,96)	0,59	1,83	1,82	1,72	1,54	1,48	0,24	(0,46)	5,00
5,50	0,95	1,49	2,82	3,00	3,41	3,32	3,09	2,72	1,79	5,50
6,00	2,14	3,36	4,55	4,99	5,29	4,87	5,83	3,73	3,65	6,00
6,50	0,08	2,98	3,65	4,90	5,63	5,93	5,78	3,95	4,19	6,50
7,00	(0,34)	0,00	2,99	2,88	3,48	3,48	2,32	1,94	2,72	7,00
7,50	(0,10)	(0,03)	0,01	(0,06)	(0,19)	(0,39)	(0,21)	(0,52)	(0,53)	7,50
8,00	0,08	(0,25)	(0,15)	(0,17)	(0,27)	(0,06)	(0,45)	(0,88)	(0,18)	8,00
8,50	(0,13)	(0,02)	(0,21)	(0,19)	0,01	(0,30)	(0,24)	(0,01)	(0,13)	8,50
9,00	0,00	0,16	(0,13)	0,21	0,08	(0,08)	(0,05)	0,02	0,04	9,00
9,50	0,19	0,00	(0,27)	(0,14)	0,25	(0,10)	(0,20)	0,00	0,08	9,50
10,00	(0,02)	0,00	(0,35)	0,07	(0,13)	(0,02)	(0,20)	(0,11)	0,12	10,00
10,50	0,12	0,04	0,03	0,06	(0,18)	0,01	(0,11)	(0,22)	0,00	10,50
11,00	0,04	0,18	(0,28)	0,09	(0,20)	0,19	0,10	(0,04)	0,36	11,00
11,50	0,29	0,37	0,19	0,17	(0,11)	0,15	0,25	0,18	0,53	11,50
12,00	0,49	(0,31)	0,14	0,00	0,15	0,44	0,03	(0,32)	0,24	12,00
	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	

## Alternativa F – Etapa II



	I	H	G	F	E	D	C	B	A	
1,00	(1,57)	(1,33)	(0,38)	(1,03)	(2,65)	(3,80)	(1,56)	(0,95)	(1,64)	1,00
1,50	(2,88)	(1,40)	(0,67)	(2,11)	(4,87)	(3,50)	(1,48)	(1,30)	(3,22)	1,50
2,00	(3,33)	(2,45)	(2,10)	(3,95)	(5,54)	(4,23)	(1,76)	(1,33)	(4,57)	2,00
2,50	(4,75)	(3,51)	(3,07)	(3,75)	(4,93)	(3,75)	(1,78)	(1,99)	(4,30)	2,50
3,00	(6,36)	(4,75)	(3,83)	(3,28)	(3,93)	(3,62)	(2,27)	(1,82)	(3,52)	3,00
3,50	(5,50)	(5,76)	(4,38)	(3,20)	(2,85)	(2,91)	(2,36)	(1,70)	(2,93)	3,50
4,00	(6,33)	(4,90)	(3,03)	(1,60)	(1,47)	(2,06)	(1,42)	(0,87)	(2,38)	4,00
4,50	(5,70)	(3,76)	(2,37)	(1,67)	(0,53)	(0,62)	0,16	(0,81)	(1,47)	4,50
5,00	(5,43)	(2,68)	(1,01)	0,00	(0,12)	1,28	0,95	0,75	(0,76)	5,00
5,50	(1,92)	(0,79)	0,91	1,59	1,89	2,20	3,44	2,66	0,95	5,50
6,00	(0,36)	0,74	1,44	3,00	3,14	3,38	4,76	3,18	2,87	6,00
6,50	0,17	0,66	1,09	2,74	3,36	3,00	3,00	3,87	2,99	6,50
7,00	0,02	(0,27)	0,54	1,23	1,13	1,15	1,05	1,87	1,89	7,00
7,50	0,48	0,17	(0,14)	(0,06)	0,01	0,28	0,78	0,73	0,12	7,50
8,00	0,32	0,18	0,27	0,10	0,08	0,24	0,50	0,64	0,15	8,00
8,50	0,36	0,10	(0,29)	0,34	(0,05)	0,24	0,27	0,42	(0,32)	8,50
9,00	(0,14)	0,06	(0,05)	0,60	0,00	0,34	0,53	(0,26)	0,09	9,00
9,50	0,24	0,00	0,05	0,44	0,39	0,05	(0,21)	0,14	0,03	9,50
10,00	(0,52)	(0,04)	0,05	(0,30)	0,10	0,35	(0,10)	(0,10)	0,03	10,00
10,50	0,05	(0,16)	(0,10)	0,06	(0,12)	(0,11)	(0,06)	0,23	0,00	10,50
11,00	(0,07)	0,00	(0,24)	0,10	0,11	0,16	0,19	0,50	0,23	11,00
11,50	0,29	(0,13)	0,05	0,19	0,04	0,28	0,34	0,29	0,45	11,50
12,00	(0,07)	(0,41)	0,26	(0,04)	0,23	0,59	0,09	(0,11)	0,11	12,00
	I	H	G	F	E	D	C	B	A	

## Alternativa G – Etapa I



	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	
1,00	(1,82)	(1,68)	(2,62)	(2,92)	(3,08)	(3,36)	(0,90)	(0,20)	(1,44)	1,00
1,50	(3,10)	(1,32)	(1,56)	(3,19)	(4,88)	(3,33)	(1,46)	(2,02)	(2,71)	1,50
2,00	(4,80)	(2,42)	(2,24)	(3,35)	(5,28)	(3,59)	(2,05)	(2,35)	(4,56)	2,00
2,50	(4,80)	(3,25)	(3,30)	(3,48)	(4,36)	(3,16)	(1,89)	(2,84)	(2,96)	2,50
3,00	(3,46)	(2,07)	(2,85)	(3,50)	(4,34)	(3,01)	(2,23)	(2,90)	(3,58)	3,00
3,50	(3,46)	(2,20)	(1,92)	(1,99)	(2,33)	(1,98)	(1,86)	(2,56)	(2,86)	3,50
4,00	(2,21)	(1,50)	(1,19)	(1,46)	(1,12)	(1,57)	(1,31)	(1,89)	(1,91)	4,00
4,50	(0,72)	(0,86)	(0,42)	(0,26)	0,25	(0,18)	(0,40)	0,01	(1,53)	4,50
5,00	0,40	1,95	2,38	2,73	1,70	2,14	1,84	(0,03)	(0,81)	5,00
5,50	2,33	3,22	4,40	4,07	3,80	3,76	4,30	3,04	1,71	5,50
6,00	3,49	5,07	5,60	5,11	5,70	4,82	4,89	4,73	3,75	6,00
6,50	2,47	4,09	4,84	5,34	5,58	5,44	5,83	4,36	4,10	6,50
7,00	0,14	2,24	3,55	4,89	3,75	3,52	3,24	3,30	2,59	7,00
7,50	0,32	0,23	0,79	1,69	1,38	0,99	0,69	1,19	(0,12)	7,50
8,00	0,17	0,17	0,18	0,45	0,06	0,26	(0,11)	(0,25)	0,03	8,00
8,50	0,00	0,04	0,32	0,21	(0,10)	0,12	0,18	0,19	0,12	8,50
9,00	0,03	0,53	0,41	(0,26)	0,08	0,14	0,17	0,10	(0,30)	9,00
9,50	0,06	0,25	0,16	(0,12)	0,07	0,26	0,08	0,23	0,00	9,50
10,00	0,15	0,20	0,87	(0,43)	0,26	0,13	(0,25)	0,26	(0,26)	10,00
10,50	(0,12)	0,29	0,12	0,18	0,32	0,35	0,27	0,14	0,06	10,50
11,00	0,00	0,08	0,26	0,24	0,16	(0,15)	0,00	(0,18)	(0,09)	11,00
11,50	0,29	0,14	0,14	(0,19)	(0,23)	0,15	(0,34)	0,27	(0,21)	11,50
12,00	0,09	0,04	(0,30)	0,05	0,26	0,02	(0,12)	0,14	(0,20)	12,00
	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	

## Alternativa G – Etapa II



	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	
1,00	(2,22)	(2,45)	(2,38)	(3,66)	(4,62)	(3,46)	(0,52)	(0,90)	(2,07)	1,00
1,50	(4,02)	(2,20)	(2,11)	(3,96)	(5,56)	(3,15)	(1,71)	(0,99)	(3,61)	1,50
2,00	(4,89)	(3,66)	(2,82)	(4,72)	(6,17)	(3,91)	(2,36)	(3,00)	(4,00)	2,00
2,50	(4,03)	(3,74)	(3,71)	(4,00)	(4,96)	(4,20)	(3,50)	(2,95)	(3,95)	2,50
3,00	(4,90)	(3,03)	(3,71)	(3,55)	(4,02)	(3,43)	(2,94)	(3,28)	(4,93)	3,00
3,50	(2,97)	(3,50)	(2,13)	(2,55)	(3,16)	(2,78)	(3,14)	(2,86)	(4,90)	3,50
4,00	(3,02)	(2,67)	(1,21)	(2,13)	(1,30)	(1,52)	(2,57)	(3,17)	(4,95)	4,00
4,50	(2,06)	(1,33)	(0,30)	(0,34)	(0,60)	(0,47)	(1,78)	(2,76)	(3,82)	4,50
5,00	(1,27)	0,10	1,06	0,30	0,77	0,94	0,66	(0,95)	(2,49)	5,00
5,50	0,14	1,54	2,25	2,06	2,34	1,92	2,10	(0,30)	(1,04)	5,50
6,00	0,54	0,81	2,06	2,88	3,25	3,60	2,53	0,63	0,30	6,00
6,50	0,08	0,46	0,80	2,36	3,04	2,65	1,02	0,94	0,45	6,50
7,00	0,42	0,12	(0,11)	0,16	0,54	0,03	0,24	0,25	0,38	7,00
7,50	0,10	0,02	0,00	(0,37)	0,45	(0,05)	0,02	0,48	(0,34)	7,50
8,00	0,18	0,23	0,06	0,04	0,86	(0,11)	0,14	(0,30)	(0,22)	8,00
8,50	(0,13)	0,59	0,27	0,07	0,15	0,16	0,29	0,00	0,23	8,50
9,00	0,15	0,54	0,22	(0,02)	0,19	0,12	0,27	(0,14)	(0,30)	9,00
9,50	(0,24)	0,05	0,34	0,16	0,19	0,22	(0,06)	0,24	(0,26)	9,50
10,00	0,02	0,17	0,49	(0,28)	0,29	(0,06)	(0,25)	0,00	0,12	10,00
10,50	(0,09)	0,04	0,04	(0,11)	0,21	0,14	(0,05)	0,01	0,09	10,50
11,00	(0,12)	(0,06)	0,34	0,20	0,04	(0,25)	0,14	(0,40)	(0,02)	11,00
11,50	0,21	0,18	0,06	(0,18)	0,20	0,11	(0,11)	0,07	(0,43)	11,50
12,00	(0,03)	(0,41)	(0,51)	0,22	(0,03)	0,02	(0,33)	0,09	(0,27)	12,00
	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	



## Alternativa H – Etapa I



	I	H	G	F	E	D	C	B	A	
1,00	(0,87)	(1,06)	(1,07)	(1,54)	(1,44)	(1,26)	(1,12)	(0,37)	(1,47)	1,00
1,50	(3,40)	(1,65)	(0,86)	(1,98)	(3,32)	(2,75)	(0,64)	(1,37)	(2,65)	1,50
2,00	(3,39)	(2,77)	(1,50)	(3,34)	(4,86)	(3,72)	(1,48)	(2,16)	(3,36)	2,00
2,50	(4,26)	(3,07)	(2,65)	(3,96)	(5,04)	(4,27)	(2,44)	(3,00)	(4,14)	2,50
3,00	(5,50)	(3,60)	(3,60)	(3,68)	(4,26)	(4,16)	(2,76)	(3,39)	(3,42)	3,00
3,50	(6,30)	(4,55)	(4,06)	(3,99)	(3,61)	(4,28)	(2,88)	(3,46)	(3,77)	3,50
4,00	(6,16)	(4,64)	(3,61)	(3,82)	(3,54)	(4,04)	(3,40)	(4,00)	(4,63)	4,00
4,50	(5,44)	(4,90)	(3,27)	(3,43)	(3,28)	(3,19)	(2,24)	(3,25)	(3,94)	4,50
5,00	(3,63)	(3,43)	(2,06)	(2,02)	(1,86)	(1,70)	(1,66)	(2,37)	(3,92)	5,00
5,50	(2,52)	(1,91)	(0,23)	(0,61)	(0,62)	(0,33)	(0,06)	(1,51)	(2,37)	5,50
6,00	0,19	0,13	1,40	1,12	0,64	1,95	1,99	0,79	(0,35)	6,00
6,50	3,44	3,15	3,12	3,76	3,35	3,24	4,11	3,30	2,37	6,50
7,00	5,55	5,27	5,30	5,96	5,25	5,86	5,76	4,92	4,20	7,00
7,50	5,68	6,36	7,03	6,57	7,18	6,60	7,34	6,83	5,82	7,50
8,00	5,55	5,88	6,40	6,74	7,53	7,39	6,88	6,80	6,07	8,00
8,50	3,78	3,27	5,00	5,29	6,09	6,77	4,94	5,46	4,94	8,50
9,00	0,24	0,15	1,04	1,80	2,72	2,78	2,72	2,10	2,32	9,00
9,50	0,40	0,20	0,11	0,08	(0,32)	(0,31)	(0,13)	(0,21)	0,18	9,50
10,00	0,08	0,32	0,16	0,17	0,03	(0,13)	(0,38)	(0,03)	0,26	10,00
10,50	0,21	0,22	(0,01)	0,05	0,00	(0,15)	0,09	(0,35)	(0,06)	10,50
11,00	0,30	0,40	(0,05)	(0,06)	0,06	(0,02)	(0,12)	(0,28)	(0,52)	11,00
11,50	0,32	0,10	(0,12)	(0,12)	(0,32)	(0,42)	(0,03)	(0,16)	0,14	11,50
12,00	0,39	(0,18)	(0,29)	(0,16)	(0,10)	0,00	(0,07)	(0,05)	(0,20)	12,00
	I	H	G	F	E	D	C	B	A	

## Alternativa H – Etapa II



	I	H	G	F	E	D	C	B	A	
1,00	(1,82)	(1,67)	(1,47)	(2,38)	(2,30)	(2,47)	(1,12)	(1,81)	(2,24)	1,00
1,50	(2,03)	(2,04)	(1,00)	(3,01)	(3,91)	(1,68)	(0,62)	(1,12)	(2,66)	1,50
2,00	(3,62)	(2,32)	(1,44)	(4,30)	(5,52)	(3,71)	(1,03)	(2,75)	(3,75)	2,00
2,50	(4,81)	(2,35)	(1,80)	(5,15)	(5,69)	(3,70)	(2,23)	(3,29)	(4,78)	2,50
3,00	(4,96)	(2,76)	(2,13)	(4,62)	(5,46)	(3,95)	(3,27)	(4,55)	(6,01)	3,00
3,50	(4,50)	(3,00)	(4,09)	(5,46)	(5,26)	(3,54)	(3,71)	(5,46)	(5,95)	3,50
4,00	(4,50)	(3,24)	(3,71)	(4,57)	(5,41)	(4,29)	(4,47)	(5,80)	(6,76)	4,00
4,50	(3,72)	(2,74)	(3,10)	(4,34)	(4,22)	(3,85)	(4,92)	(6,61)	(7,51)	4,50
5,00	(2,81)	(2,25)	(3,50)	(3,46)	(3,76)	(4,15)	(4,50)	(6,22)	(7,69)	5,00
5,50	(2,32)	(1,83)	(1,77)	(2,71)	(3,20)	(3,06)	(3,63)	(4,91)	(6,49)	5,50
6,00	(1,48)	(0,55)	(0,67)	(1,78)	(2,44)	(2,21)	(2,20)	(3,94)	(5,14)	6,00
6,50	0,54	0,36	1,20	(0,39)	0,59	(0,40)	(0,76)	(1,87)	(3,90)	6,50
7,00	2,04	2,36	2,59	1,60	0,85	1,03	0,63	(0,66)	(1,65)	7,00
7,50	3,50	4,54	4,45	3,85	3,23	3,21	2,56	1,02	(0,04)	7,50
8,00	3,90	3,83	4,01	3,80	4,49	3,98	3,42	2,84	2,04	8,00
8,50	1,33	1,59	2,14	3,24	2,45	2,14	2,29	2,44	2,82	8,50
9,00	0,29	0,00	0,11	0,90	0,40	0,45	1,30	0,73	0,60	9,00
9,50	0,45	(0,06)	(0,10)	(0,02)	(0,31)	(0,50)	0,00	(0,10)	0,24	9,50
10,00	0,22	0,21	0,37	0,22	(0,20)	(0,56)	(0,22)	(0,20)	0,15	10,00
10,50	0,23	0,03	0,00	0,03	(0,05)	(0,19)	0,00	(0,41)	(0,25)	10,50
11,00	0,06	(0,06)	(0,16)	(0,04)	(0,06)	(0,32)	(0,05)	(0,28)	(0,42)	11,00
11,50	(0,22)	(0,76)	(0,06)	(0,08)	(0,29)	(0,44)	0,00	(0,06)	(0,13)	11,50
12,00	0,40	(0,18)	(0,11)	(0,16)	(0,09)	(0,18)	(0,20)	(0,05)	(0,10)	12,00
	I	H	G	F	E	D	C	B	A	

## Alternativa I – Etapa I



	I	H	G	F	E	D	C	B	A	
1,00	(2,60)	(1,10)	(1,15)	(1,91)	(2,30)	(2,26)	(1,15)	(2,16)	(1,93)	1,00
1,50	(2,90)	(2,37)	(1,60)	(3,10)	(4,61)	(3,65)	(0,52)	(1,69)	(3,17)	1,50
2,00	(5,01)	(1,91)	(1,59)	(4,12)	(4,80)	(3,76)	(2,26)	(2,06)	(3,50)	2,00
2,50	(5,03)	(3,30)	(3,04)	(4,52)	(5,41)	(4,76)	(2,99)	(2,90)	(3,88)	2,50
3,00	(4,80)	(3,14)	(3,18)	(3,50)	(5,06)	(4,20)	(3,46)	(3,56)	(5,39)	3,00
3,50	(5,09)	(3,99)	(3,60)	(3,42)	(4,49)	(3,79)	(4,23)	(4,71)	(5,78)	3,50
4,00	(4,72)	(3,69)	(3,36)	(3,50)	(3,20)	(4,31)	(3,67)	(3,96)	(5,95)	4,00
4,50	(4,32)	(3,27)	(2,40)	(2,43)	(2,56)	(1,88)	(2,16)	(4,01)	(5,26)	4,50
5,00	(2,30)	(1,92)	(0,36)	(0,84)	(0,93)	(1,31)	(1,35)	(2,08)	(3,67)	5,00
5,50	(0,43)	0,54	1,70	1,37	2,69	0,74	0,59	(0,70)	(1,48)	5,50
6,00	1,95	2,70	2,96	2,55	2,54	2,45	3,10	1,80	0,67	6,00
6,50	4,34	3,83	4,91	5,07	5,00	4,71	4,93	4,19	3,49	6,50
7,00	4,92	5,92	5,19	6,07	6,64	6,14	6,03	5,78	5,32	7,00
7,50	4,06	5,10	5,77	6,75	6,40	6,65	6,70	5,89	5,35	7,50
8,00	2,55	3,14	3,84	5,50	4,79	3,86	3,90	3,11	3,40	8,00
8,50	(0,63)	0,30	0,50	1,25	2,39	0,88	0,64	0,30	0,52	8,50
9,00	(0,07)	0,00	(0,70)	(0,08)	(0,49)	(0,51)	0,05	(0,36)	0,37	9,00
9,50	(0,12)	0,03	(0,38)	(0,18)	(0,81)	(0,19)	(0,17)	(0,12)	0,36	9,50
10,00	(0,51)	0,10	(0,31)	(0,26)	(0,31)	(0,01)	0,20	0,10	0,22	10,00
10,50	(0,21)	(0,60)	(0,40)	(0,30)	(0,65)	(0,14)	0,06	(0,15)	0,08	10,50
11,00	(0,19)	(0,10)	(0,42)	(0,17)	(0,41)	(0,60)	(0,59)	(0,25)	0,08	11,00
11,50	(0,21)	(0,30)	(0,42)	(0,48)	0,15	(0,06)	0,08	(0,16)	0,07	11,50
12,00	(0,15)	(0,30)	(0,07)	0,10	(0,49)	(0,37)	(0,06)	(0,16)	0,45	12,00
	I	H	G	F	E	D	C	B	A	

## Alternativa I – Etapa II



	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	
1,00	(1,11)	(1,00)	(1,70)	(2,07)	(2,81)	(2,88)	(0,86)	(1,31)	(1,30)	1,00
1,50	(3,44)	(2,03)	(1,06)	(2,80)	(3,70)	(2,62)	(1,00)	(1,69)	(2,89)	1,50
2,00	(4,10)	(3,00)	(1,82)	(3,49)	(5,52)	(4,42)	(1,86)	(2,20)	(3,52)	2,00
2,50	(5,60)	(3,63)	(3,02)	(4,11)	(4,80)	(4,76)	(3,57)	(2,79)	(4,27)	2,50
3,00	(4,80)	(3,63)	(3,41)	(4,41)	(5,69)	(4,70)	(3,50)	(3,93)	(5,76)	3,00
3,50	(4,86)	(4,50)	(4,33)	(4,48)	(5,38)	(4,46)	(4,37)	(5,20)	(5,49)	3,50
4,00	(5,00)	(4,88)	(3,90)	(3,39)	(4,00)	(4,52)	(4,19)	(4,94)	(6,36)	4,00
4,50	(5,12)	(3,74)	(3,44)	(3,46)	(4,66)	(4,26)	(3,55)	(4,86)	(5,10)	4,50
5,00	(3,82)	(2,48)	(2,40)	(2,44)	(2,55)	(2,45)	(2,46)	(3,92)	(5,33)	5,00
5,50	(2,06)	(1,16)	(0,64)	(0,61)	(0,76)	(0,14)	(0,75)	(3,02)	(3,42)	5,50
6,00	(0,35)	0,38	(0,33)	1,30	0,86	(0,20)	1,01	(1,00)	(1,18)	6,00
6,50	1,14	1,44	2,86	2,32	1,93	0,62	2,33	0,08	0,24	6,50
7,00	0,75	0,60	(0,40)	2,05	2,10	1,90	2,50	1,75	1,01	7,00
7,50	0,42	0,33	(0,07)	0,41	1,06	0,68	1,24	1,07	0,60	7,50
8,00	0,48	(0,19)	(0,14)	(0,06)	0,80	0,70	0,09	0,44	0,60	8,00
8,50	(0,30)	0,15	(0,25)	(0,03)	0,06	0,49	0,17	0,29	0,19	8,50
9,00	(0,21)	0,06	(0,40)	(0,21)	(0,91)	(0,06)	0,04	0,18	0,46	9,00
9,50	(0,33)	(0,14)	0,10	0,20	(0,33)	0,49	0,23	0,30	0,23	9,50
10,00	(0,70)	(0,40)	(0,80)	(0,38)	(0,14)	(0,82)	0,29	0,15	0,39	10,00
10,50	(0,37)	(0,11)	(0,90)	(0,64)	(0,95)	0,18	(0,10)	(0,02)	0,03	10,50
11,00	(0,20)	(0,33)	(0,18)	(0,40)	(1,00)	(0,20)	(0,07)	(0,02)	0,48	11,00
11,50	(0,28)	(0,50)	(0,60)	(0,60)	(0,58)	(0,21)	(0,07)	0,28	0,07	11,50
12,00	0,09	(0,91)	(0,30)	(0,73)	(0,64)	0,30	0,12	0,00	0,34	12,00
	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	



## Alternativa J – Etapa I



	I	H	G	F	E	D	C	B	A	
1,00	(1,40)	(1,82)	(1,91)	(2,30)	(2,84)	(2,76)	(2,01)	(1,81)	(1,80)	1,00
1,50	(3,63)	(2,65)	(1,37)	(3,50)	(4,84)	(3,29)	(1,14)	(1,58)	(3,20)	1,50
2,00	(4,85)	(3,16)	(1,95)	(3,79)	(5,26)	(4,20)	(2,13)	(2,30)	(3,95)	2,00
2,50	(4,60)	(3,54)	(2,96)	(3,95)	(5,69)	(4,91)	(2,87)	(2,79)	(5,12)	2,50
3,00	(4,60)	(3,31)	(3,88)	(4,13)	(4,78)	(4,35)	(3,49)	(2,99)	(4,79)	3,00
3,50	(4,86)	(4,31)	(3,17)	(4,00)	(4,24)	(3,93)	(4,55)	(4,25)	(4,53)	3,50
4,00	(3,48)	(3,20)	(2,48)	(3,17)	(3,29)	(3,07)	(2,90)	(3,86)	(4,82)	4,00
4,50	(3,81)	(2,12)	(1,48)	(1,85)	(1,81)	(1,08)	(2,36)	(2,82)	(3,94)	4,50
5,00	(2,14)	(1,25)	(0,37)	(0,57)	(0,75)	0,08	0,29	(1,09)	(2,98)	5,00
5,50	(0,22)	0,50	2,19	1,50	1,60	2,48	1,65	1,68	(0,89)	5,50
6,00	3,36	3,71	4,01	3,90	3,57	3,91	3,99	3,22	1,91	6,00
6,50	5,79	5,53	5,87	5,50	6,04	6,55	5,83	5,52	5,44	6,50
7,00	5,73	6,37	6,54	6,52	7,11	6,56	6,23	6,88	5,89	7,00
7,50	5,36	5,56	6,82	6,89	7,00	7,30	6,87	6,36	5,50	7,50
8,00	2,08	2,86	4,60	5,22	5,10	5,42	5,97	4,89	4,64	8,00
8,50	0,38	0,74	2,58	1,71	1,35	1,54	1,68	1,44	0,62	8,50
9,00	(0,33)	(0,07)	(0,10)	0,06	(0,08)	0,60	(0,08)	(0,13)	0,06	9,00
9,50	0,01	0,00	0,10	0,20	(0,44)	(0,25)	0,37	0,42	0,03	9,50
10,00	0,00	0,12	0,10	(0,32)	(0,25)	(0,27)	0,23	0,02	0,17	10,00
10,50	0,01	(0,11)	(0,13)	0,21	(0,09)	0,12	0,44	(0,13)	0,21	10,50
11,00	(0,09)	(0,38)	(0,03)	(0,02)	0,03	0,35	0,19	0,10	0,06	11,00
11,50	0,00	0,03	0,00	(0,22)	0,04	3,65	0,38	0,25	0,13	11,50
12,00	(0,43)	(0,37)	(0,33)	0,13	(0,10)	(0,09)	0,31	(0,25)	0,05	12,00
	I	H	G	F	E	D	C	B	A	

## Alternativa J – Etapa II



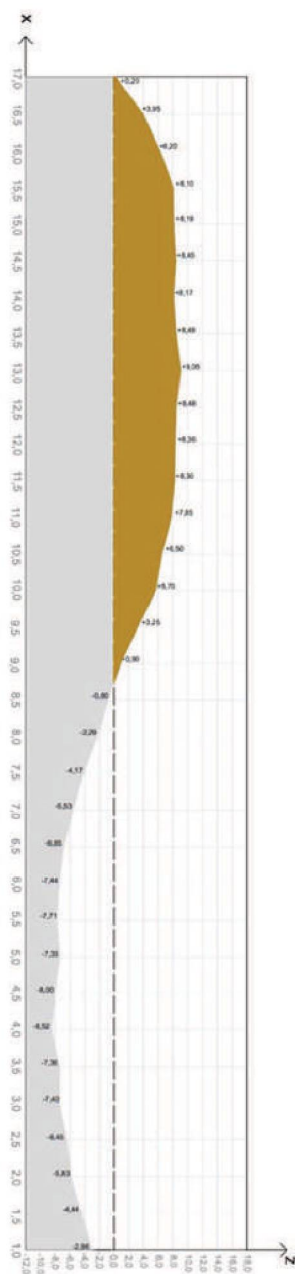
	I	H	G	F	E	D	C	B	A	
1,00	(2,40)	(1,75)	(2,17)	(3,35)	(3,36)	(2,82)	(1,86)	(1,87)	(1,88)	1,00
1,50	(3,23)	(1,62)	(1,83)	(3,86)	(5,23)	(2,91)	(1,60)	(1,50)	(2,95)	1,50
2,00	(5,27)	(2,29)	(2,52)	(5,09)	(5,54)	(4,06)	(2,26)	(2,68)	(4,26)	2,00
2,50	(5,56)	(4,00)	(3,01)	(4,20)	(5,43)	(4,64)	(3,12)	(3,30)	(4,71)	2,50
3,00	(5,77)	(4,20)	(3,41)	(4,56)	(5,40)	(4,82)	(4,34)	(3,26)	(4,89)	3,00
3,50	(5,53)	(4,82)	(4,03)	(4,50)	(5,00)	(4,28)	(3,40)	(4,38)	(5,36)	3,50
4,00	(5,37)	(4,88)	(3,56)	(3,61)	(3,26)	(3,76)	(3,22)	(4,45)	(5,86)	4,00
4,50	(5,42)	(3,85)	(2,57)	(2,58)	(2,95)	(2,74)	(2,24)	(3,36)	(4,68)	4,50
5,00	(3,50)	(3,03)	(1,34)	(0,95)	(1,22)	(1,17)	(2,08)	(2,09)	(4,06)	5,00
5,50	(0,62)	(0,77)	0,00	0,79	(0,20)	(0,13)	0,17	(1,76)	(2,48)	5,50
6,00	0,38	0,41	1,09	1,16	1,76	1,09	1,68	0,06	(0,12)	6,00
6,50	0,77	1,24	2,25	3,15	2,97	3,49	2,54	2,37	1,06	6,50
7,00	(0,10)	0,35	0,57	2,09	2,48	2,88	2,52	1,68	0,48	7,00
7,50	(0,55)	(0,37)	(0,46)	0,29	0,54	0,22	0,12	0,53	0,26	7,50
8,00	(0,56)	(0,29)	(0,31)	(0,31)	0,00	(0,20)	(0,09)	(0,20)	0,10	8,00
8,50	(0,16)	0,03	(0,20)	0,06	0,12	0,25	(0,07)	(0,08)	0,15	8,50
9,00	(0,14)	(0,19)	(0,32)	0,14	(0,11)	(0,01)	(0,15)	0,35	(0,01)	9,00
9,50	(0,12)	0,12	(0,14)	0,21	(0,35)	(0,27)	0,22	0,32	0,43	9,50
10,00	(0,06)	0,06	(0,46)	(0,18)	(0,16)	0,03	0,12	0,04	0,38	10,00
10,50	(0,01)	(0,06)	(0,08)	0,20	0,18	0,10	0,53	(0,08)	0,10	10,50
11,00	(0,20)	(0,32)	(0,12)	(0,02)	(0,17)	0,18	0,15	0,04	0,25	11,00
11,50	(0,40)	(0,09)	(0,10)	(0,16)	0,13	0,39	0,30	0,10	0,32	11,50
12,00	(0,11)	(0,20)	(0,19)	0,13	(0,11)	0,09	0,21	(0,04)	0,03	12,00
	I	H	G	F	E	D	C	B	A	

## ANPÊNDICE F – PERFIL LONGITUDINAL AO LONGO DO EIXO CENTRAL DO CANAL EXPERIMENTAL

### Alternativa A

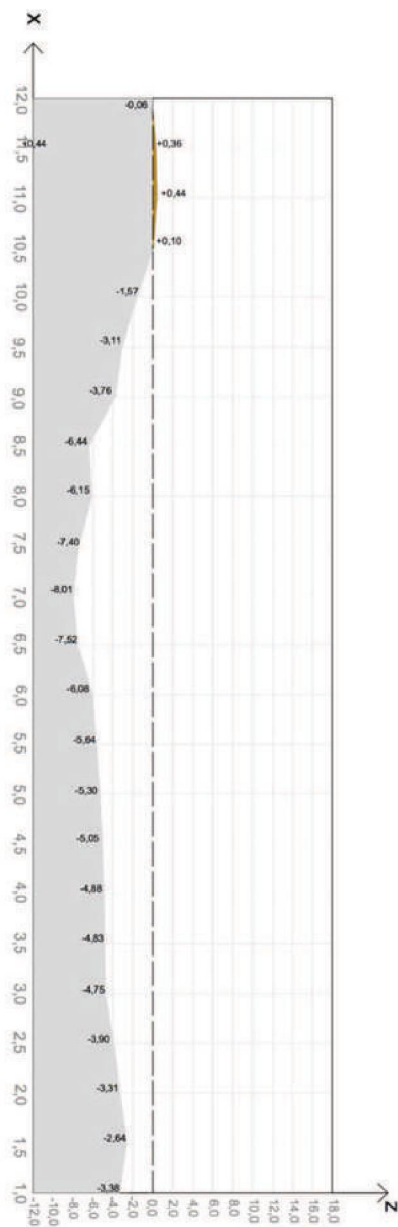
#### Etapa 1

FIGURA 105 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. A – ETAPA 1



#### Etapa 2

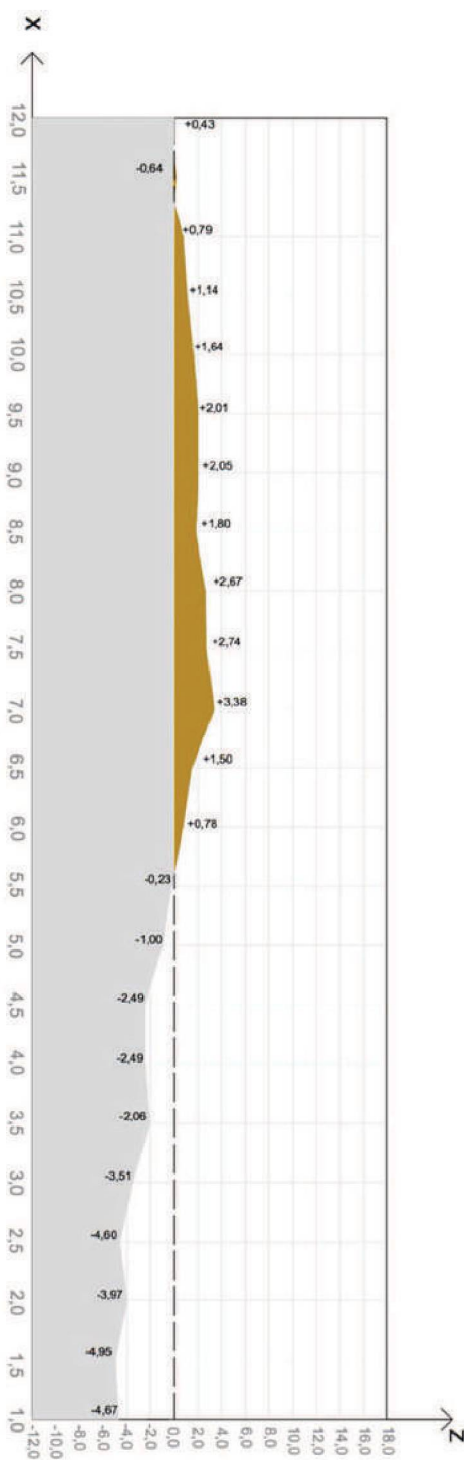
FIGURA 106 – PERFIL LONGITUDINAL DA ALT. A – ETAPA 2



## Alternativa B

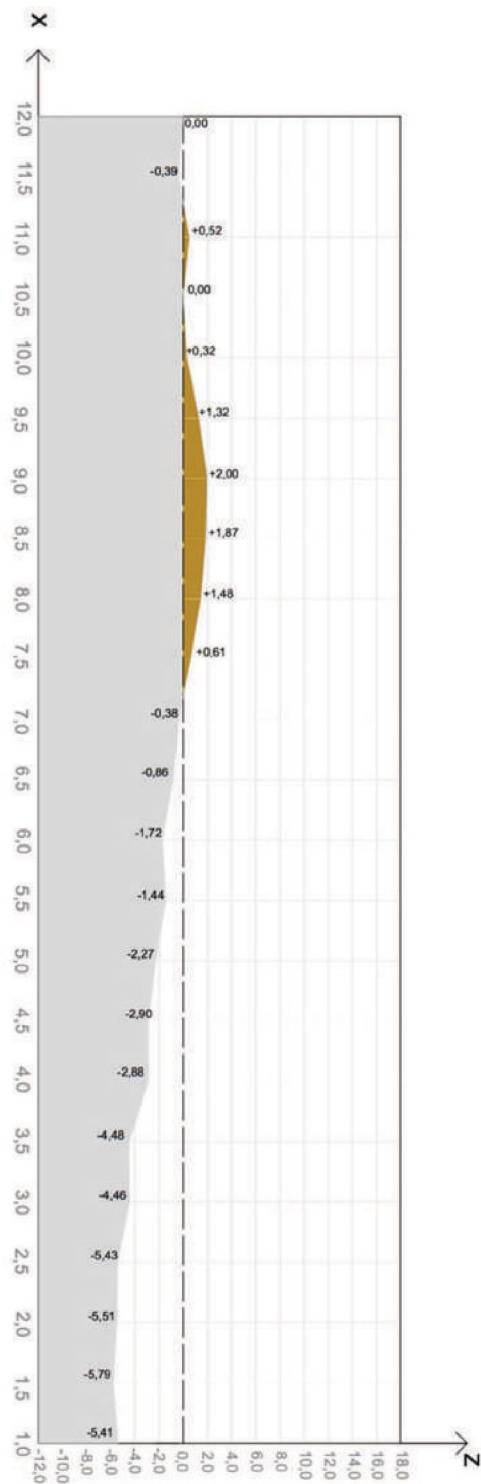
### Etapa 1

FIGURA 107 – PERFIL LONGITUDINAL DA  
ALT. B – ETAPA 1



### Etapa 2

FIGURA 108 – PERFIL LONGITUDINAL DA  
ALT. B – ETAPA 2

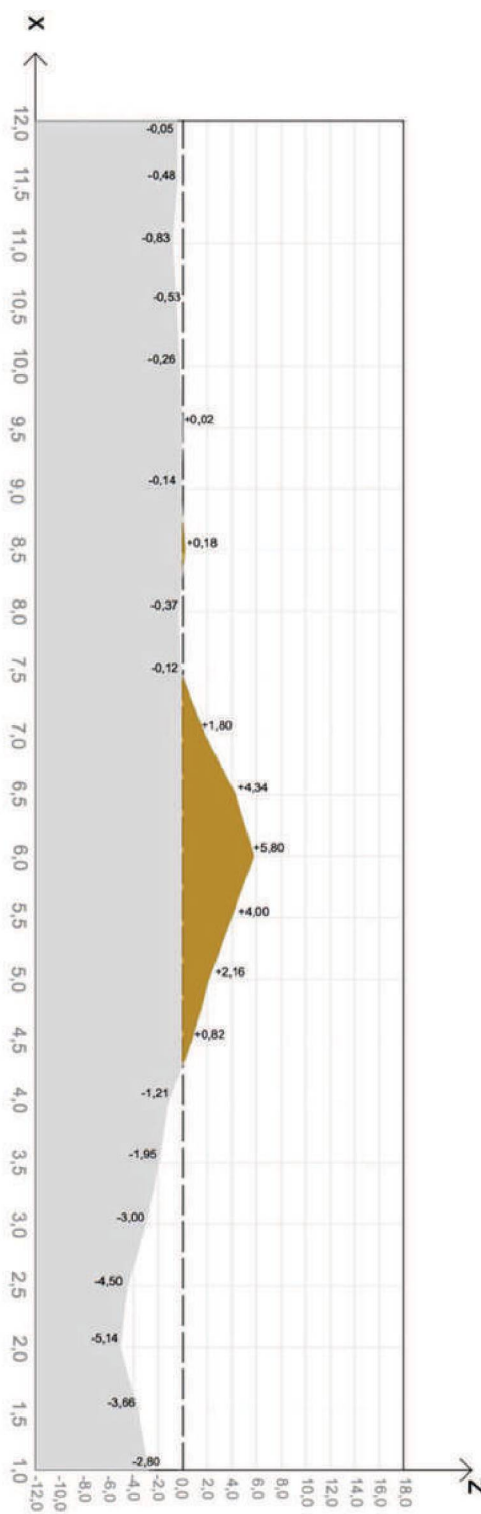




## Alternativa C

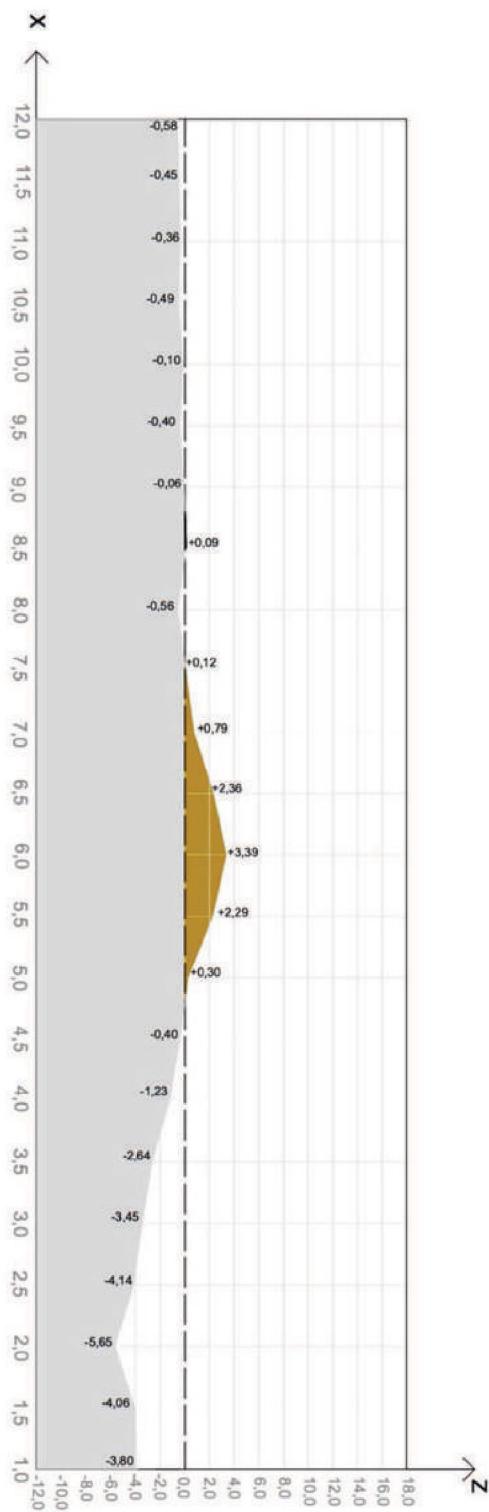
### Etapa 1

FIGURA 109 – PERFIL LONGITUDINAL DA  
ALT. C – ETAPA 1



### Etapa 2

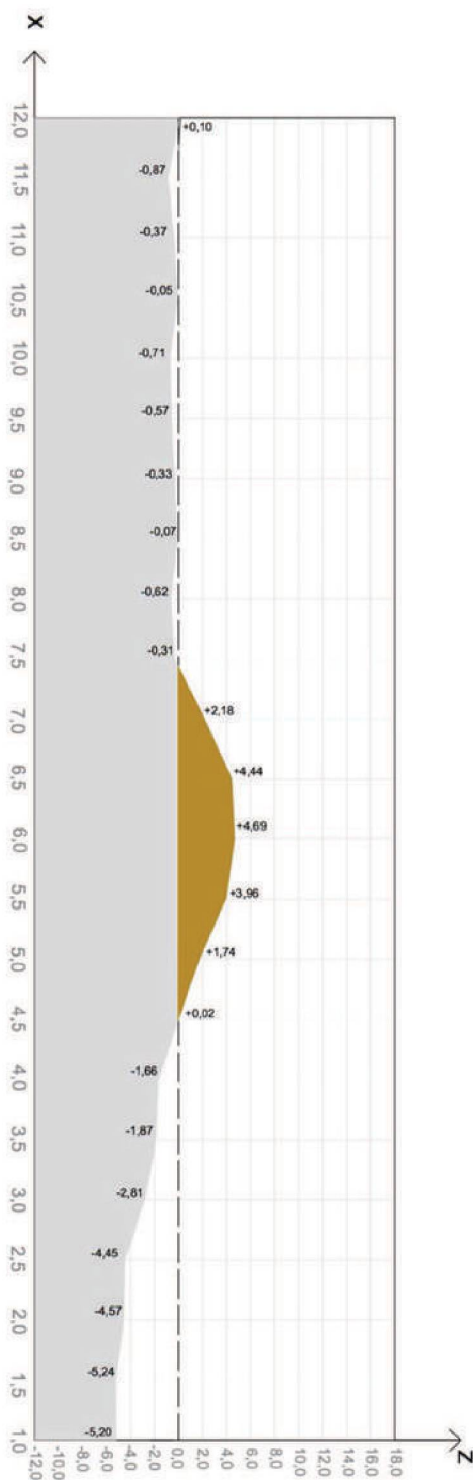
FIGURA 110 – PERFIL LONGITUDINAL DA  
ALT. C – ETAPA 2



## Alternativa D

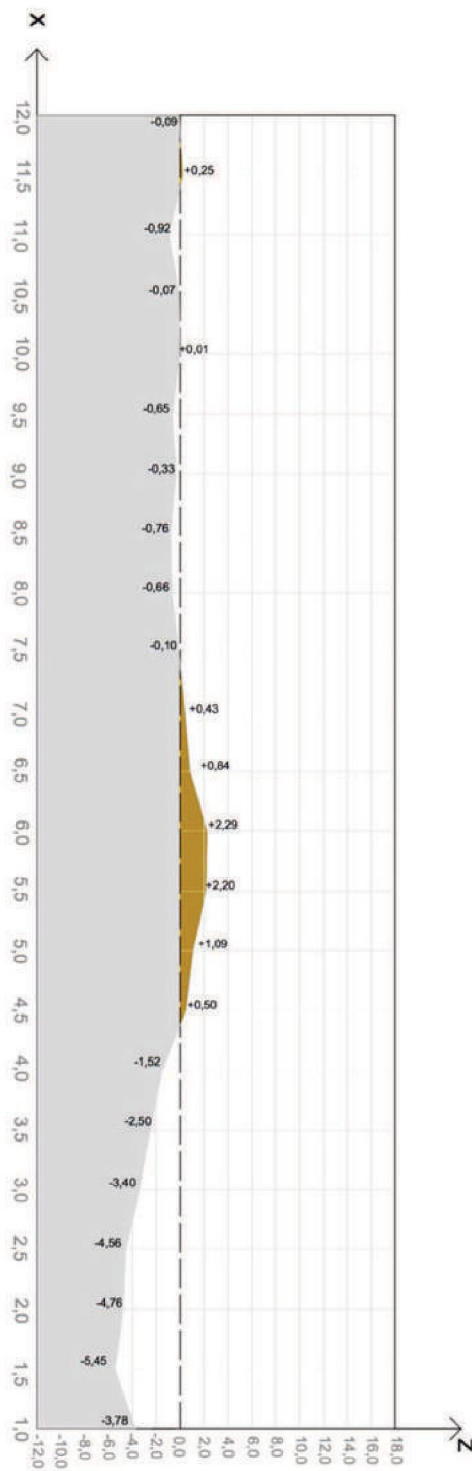
### Etapa 1

FIGURA 111 – PERFIL LONGITUDINAL DA  
ALT. D – ETAPA 1



### Etapa 2

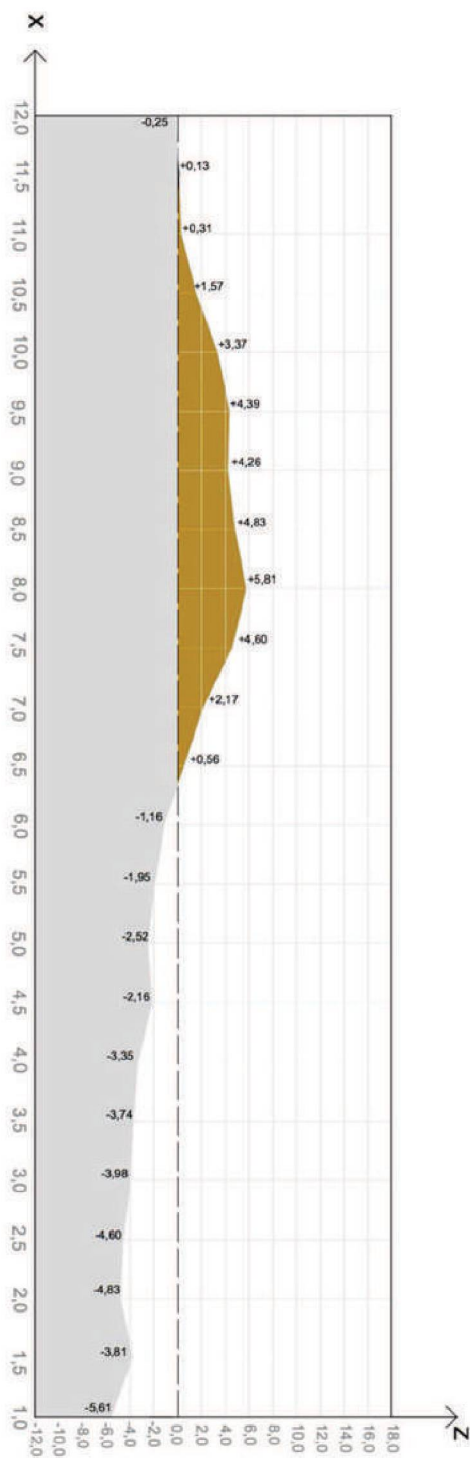
FIGURA 112 – PERFIL LONGITUDINAL DA  
ALT. D – ETAPA 2



## Alternativa E

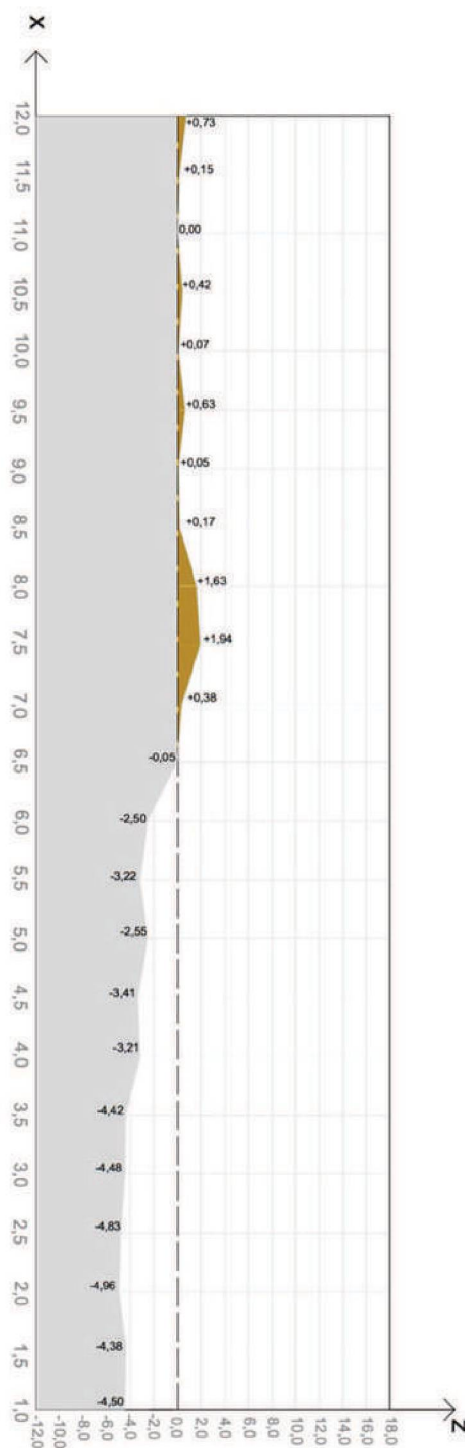
### Etapa 1

FIGURA 113 – PERFIL LONGITUDINAL DA  
ALT. E – ETAPA 1



### Etapa 2

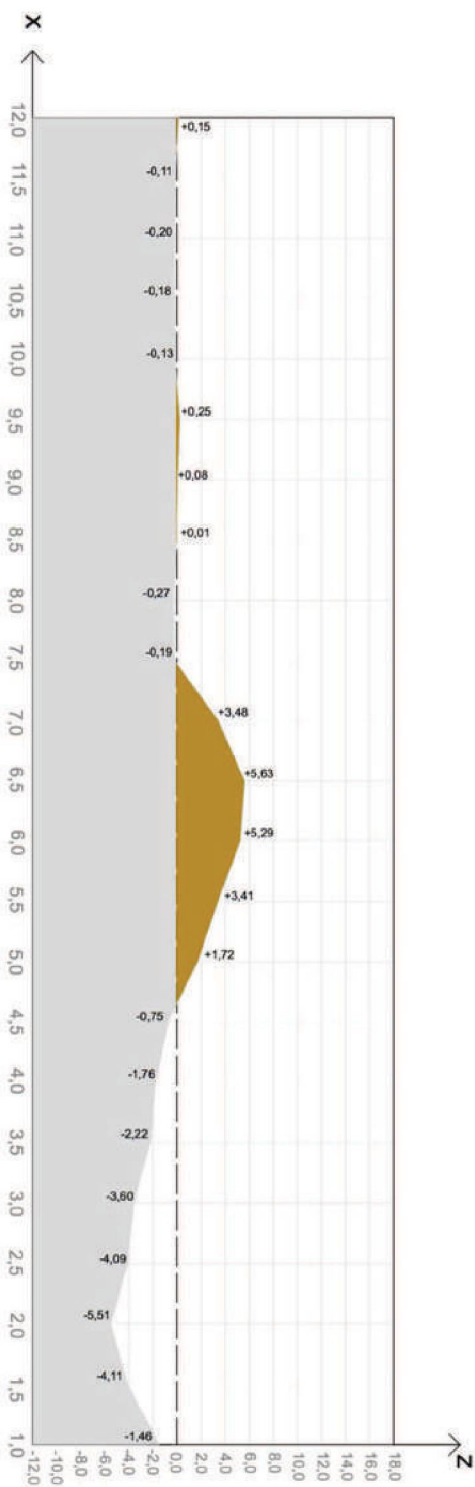
FIGURA 114 – PERFIL LONGITUDINAL DA  
ALT. E – ETAPA 2



## Alternativa F

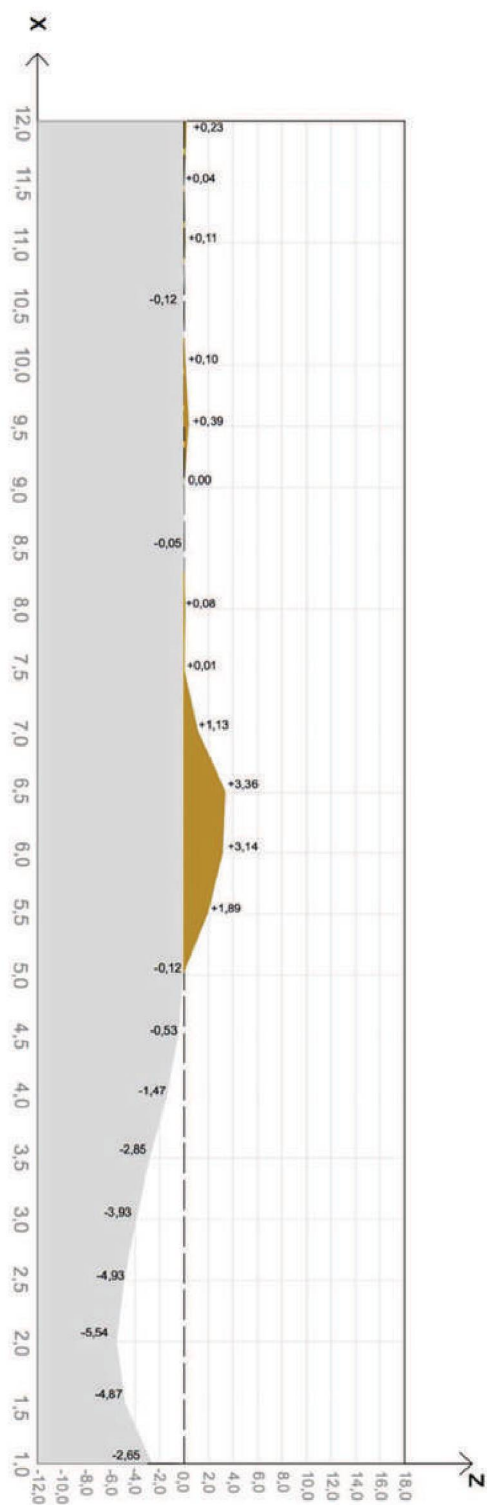
### Etapa 1

FIGURA 115 – PERFIL LONGITUDINAL DA  
ALT. F– ETAPA 1



### Etapa 2

FIGURA 116 – PERFIL LONGITUDINAL DA  
ALT. F – ETAPA 2

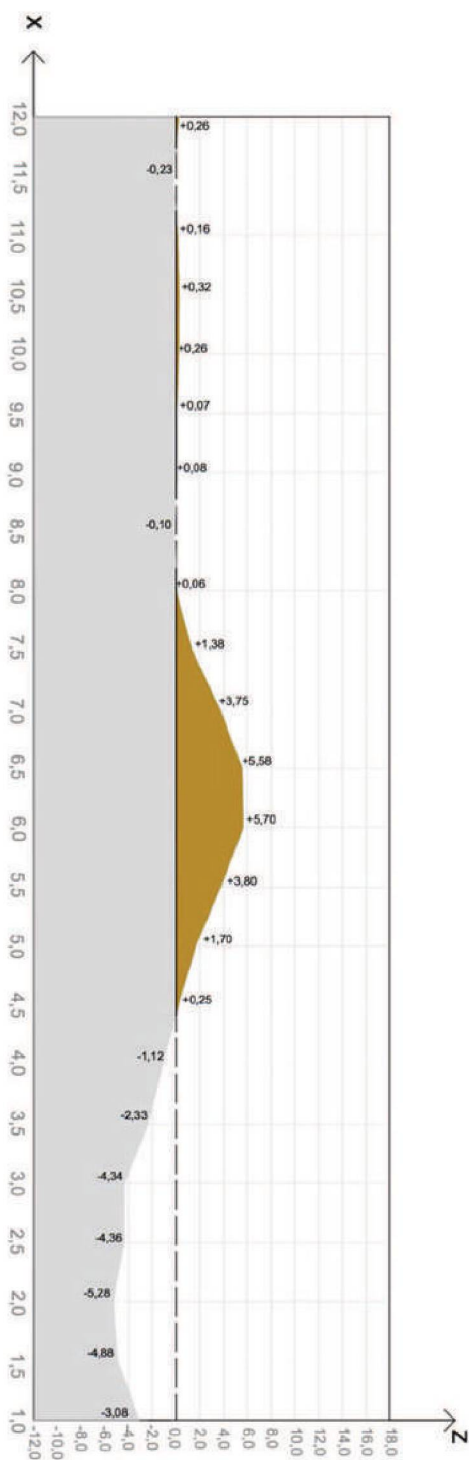




## Alternativa G

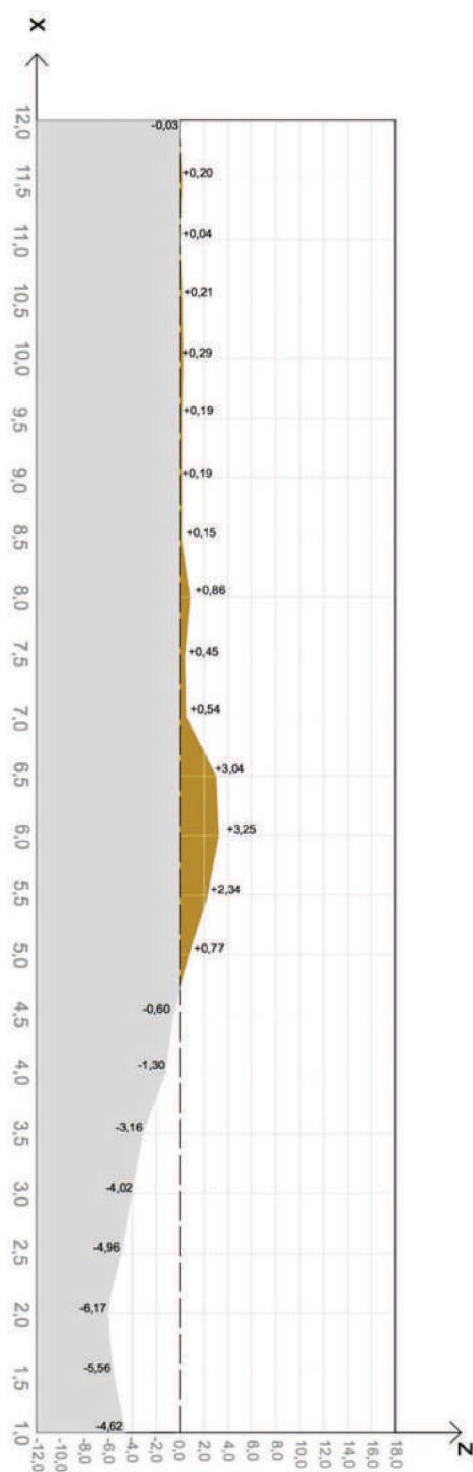
### Etapa 1

FIGURA 117 – PERFIL LONGITUDINAL DA  
ALT. G – ETAPA 1



### Etapa 2

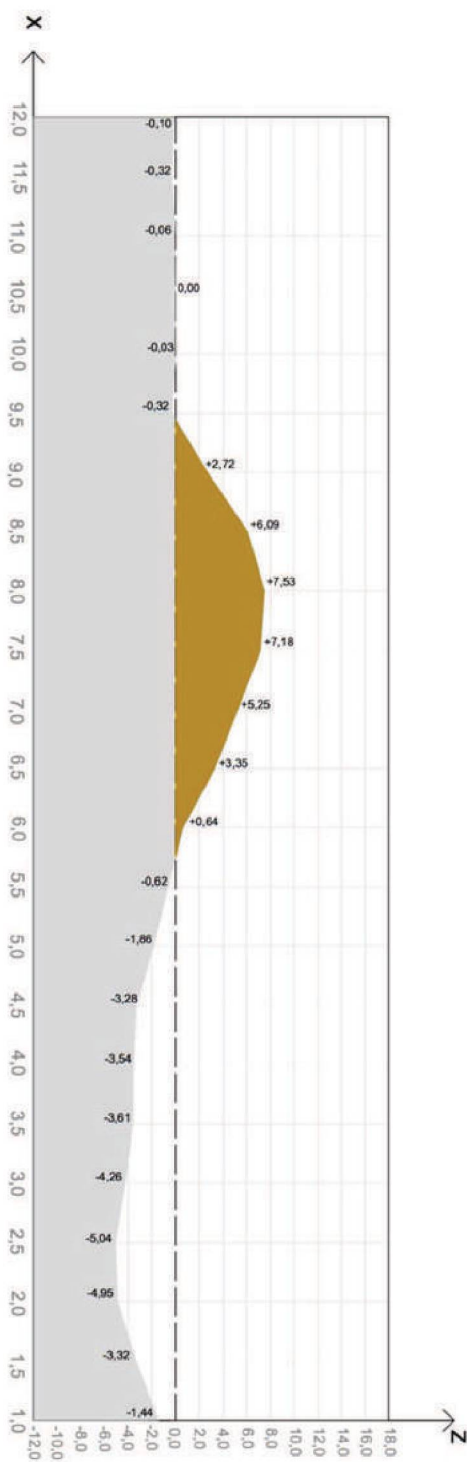
FIGURA 118 – PERFIL LONGITUDINAL DA  
ALT. G – ETAPA 2



## Alternativa H

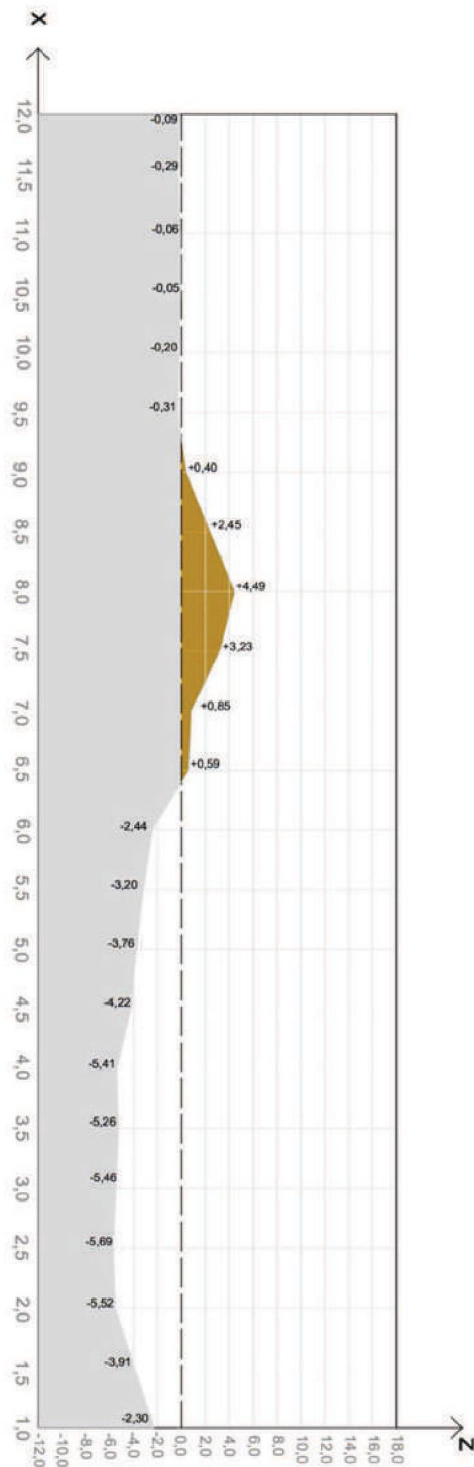
### Etapa 1

FIGURA 119 – PERFIL LONGITUDINAL DA  
ALT. H – ETAPA 1



### Etapa 2

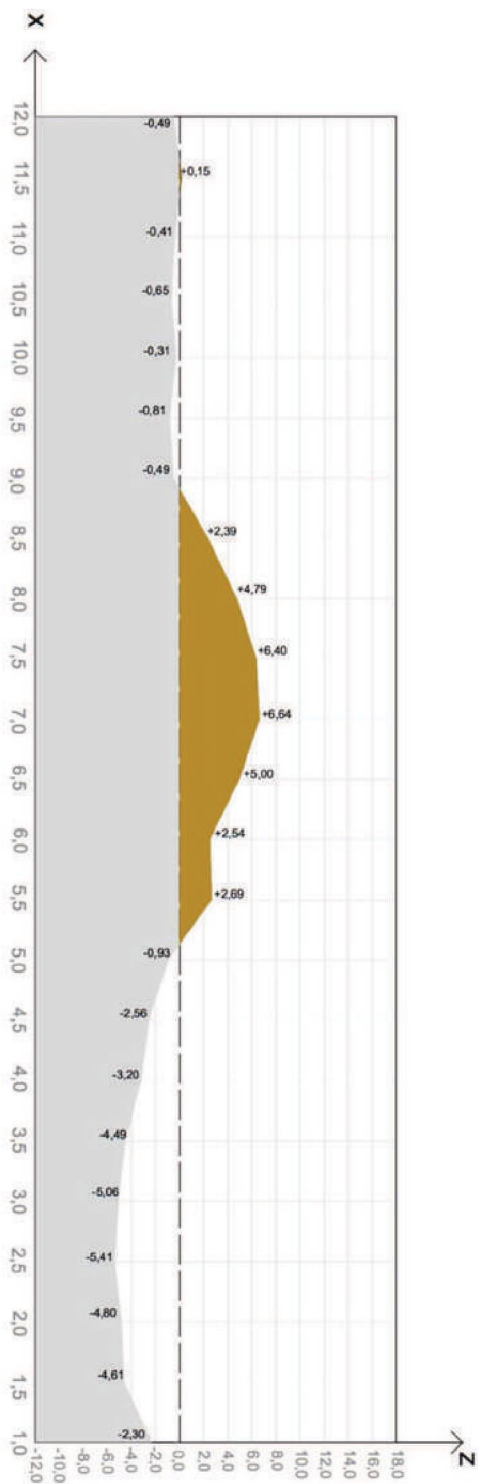
FIGURA 120 – PERFIL LONGITUDINAL DA  
ALT. H – ETAPA 2



## Alternativa I

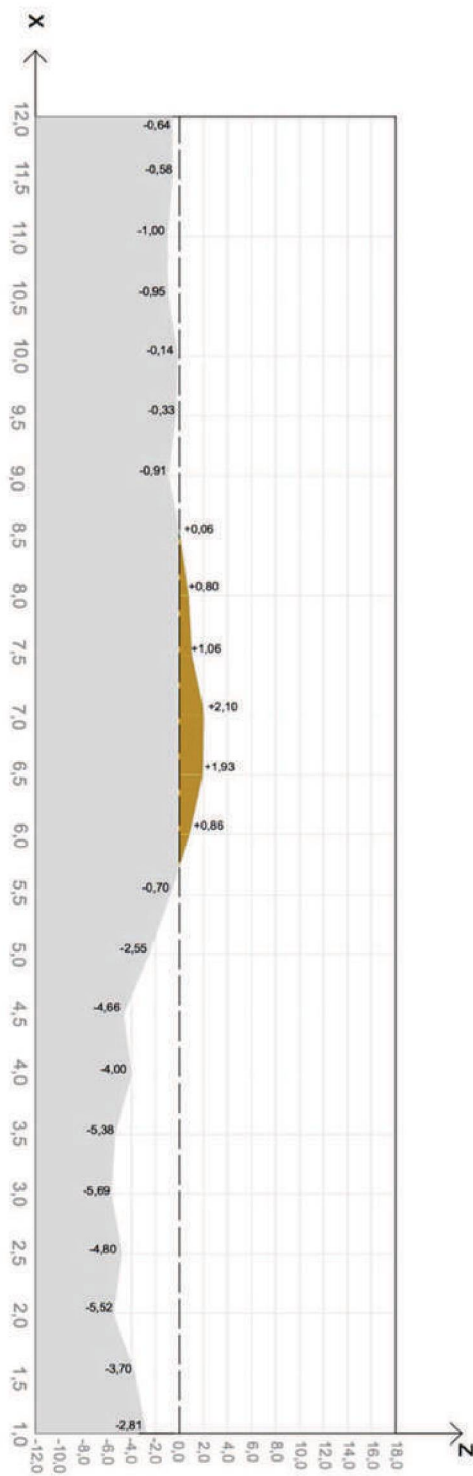
### Etapa 1

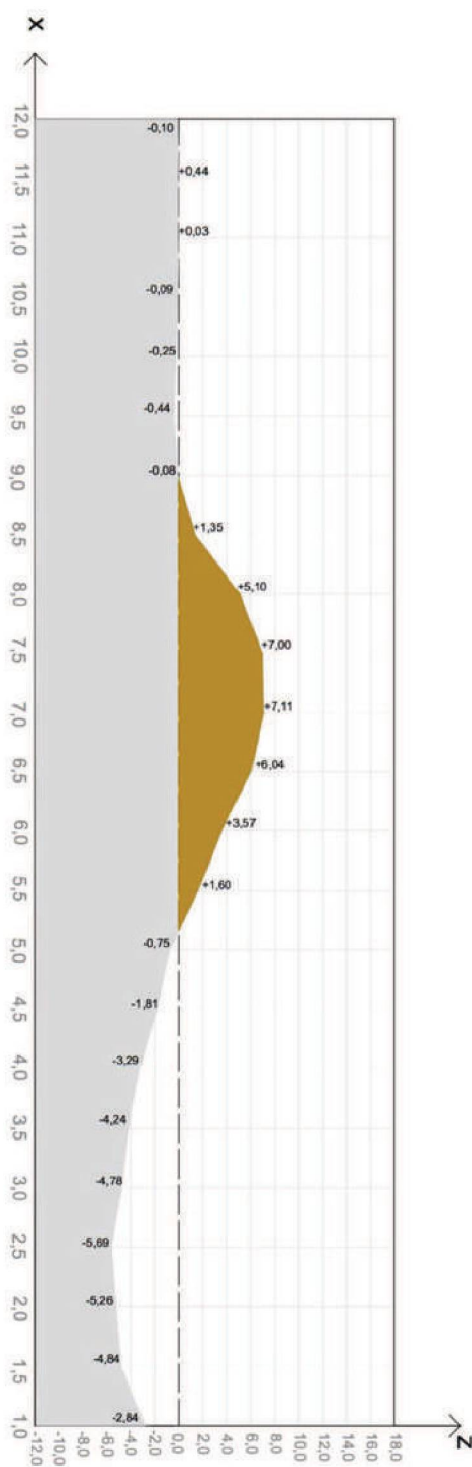
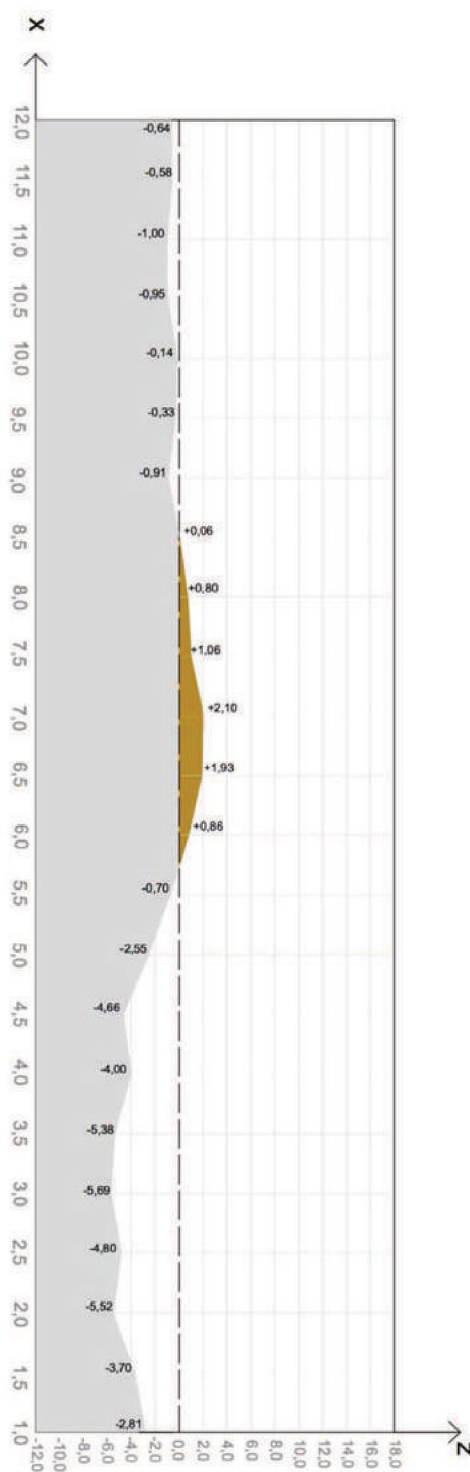
FIGURA 121 – PERFIL LONGITUDINAL DA  
ALT. I – ETAPA 1



### Etapa 2

FIGURA 122 – PERFIL LONGITUDINAL DA  
ALT. I – ETAPA 2



Alternativa JEtapa 1FIGURA 123 – PERFIL LONGITUDINAL DA  
ALT. J – ETAPA 1Etapa 2FIGURA 124 – PERFIL LONGITUDINAL DA  
ALT. J – ETAPA 2



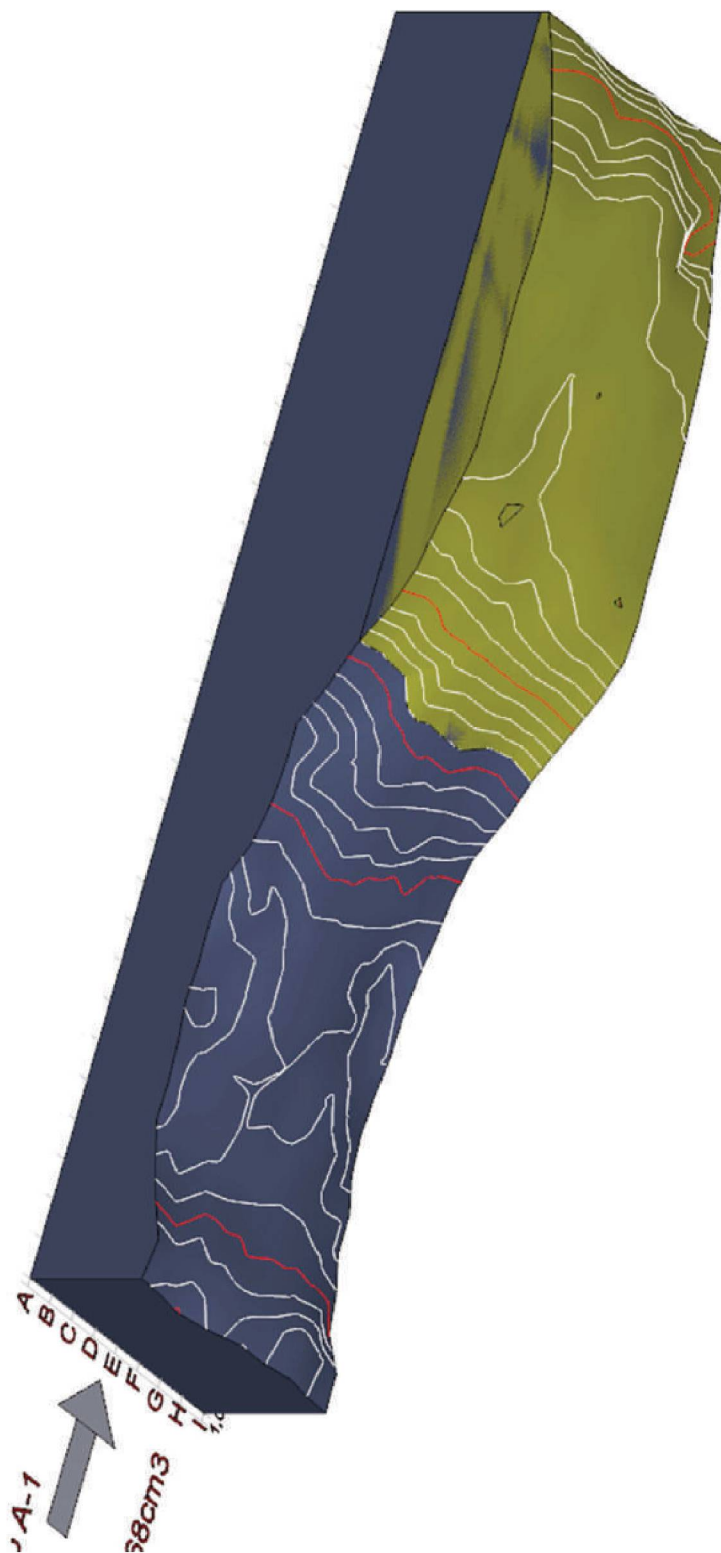
## **APÊNDICE G – REPRESENTAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE EROSÃO**

Nesta seção são mostradas as superfícies geradas dos ensaios realizados para visualização do padrão da fossa de erosão formada, para cada alternativa ensaiada.

São mostradas uma imagem da superfície gerada após o ensaio com a caixa de erosão original e outra após a remoção da barra formada após uma hora de ensaio.

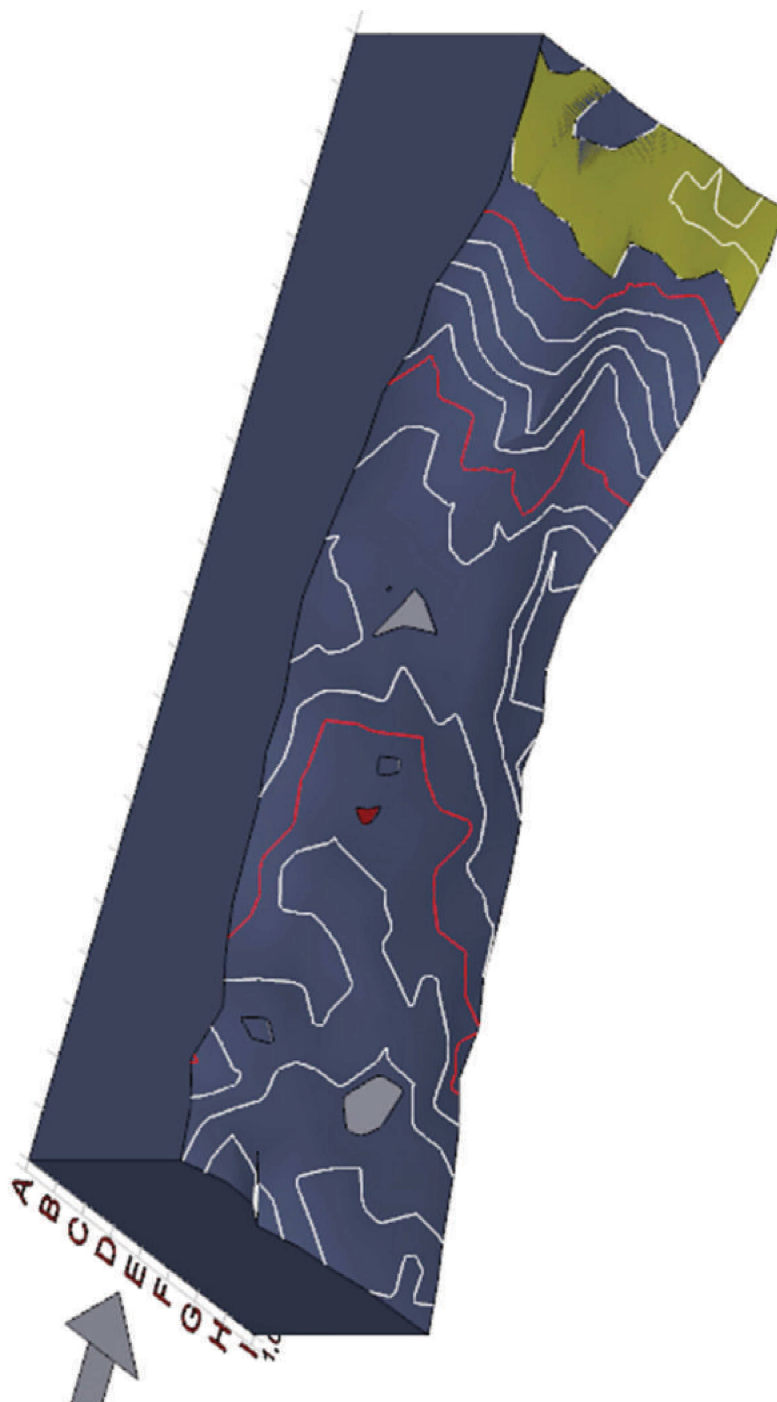
Alternativa A – Etapa 1

FIGURA 125 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. A – ETAPA 1



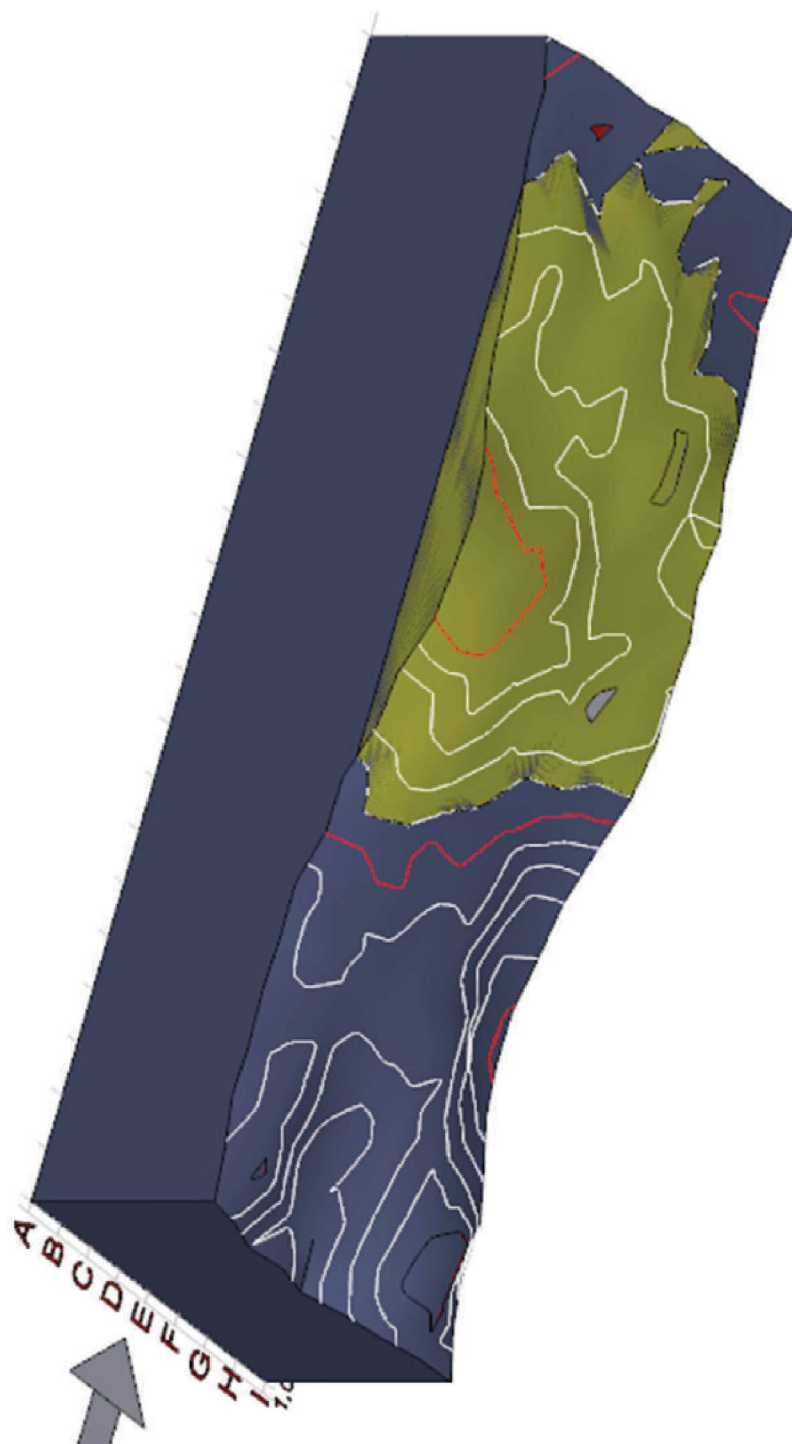
Alternativa A – Etapa 2

FIGURA 126 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. A – ETAPA 2



Alternativa B – Etapa 1

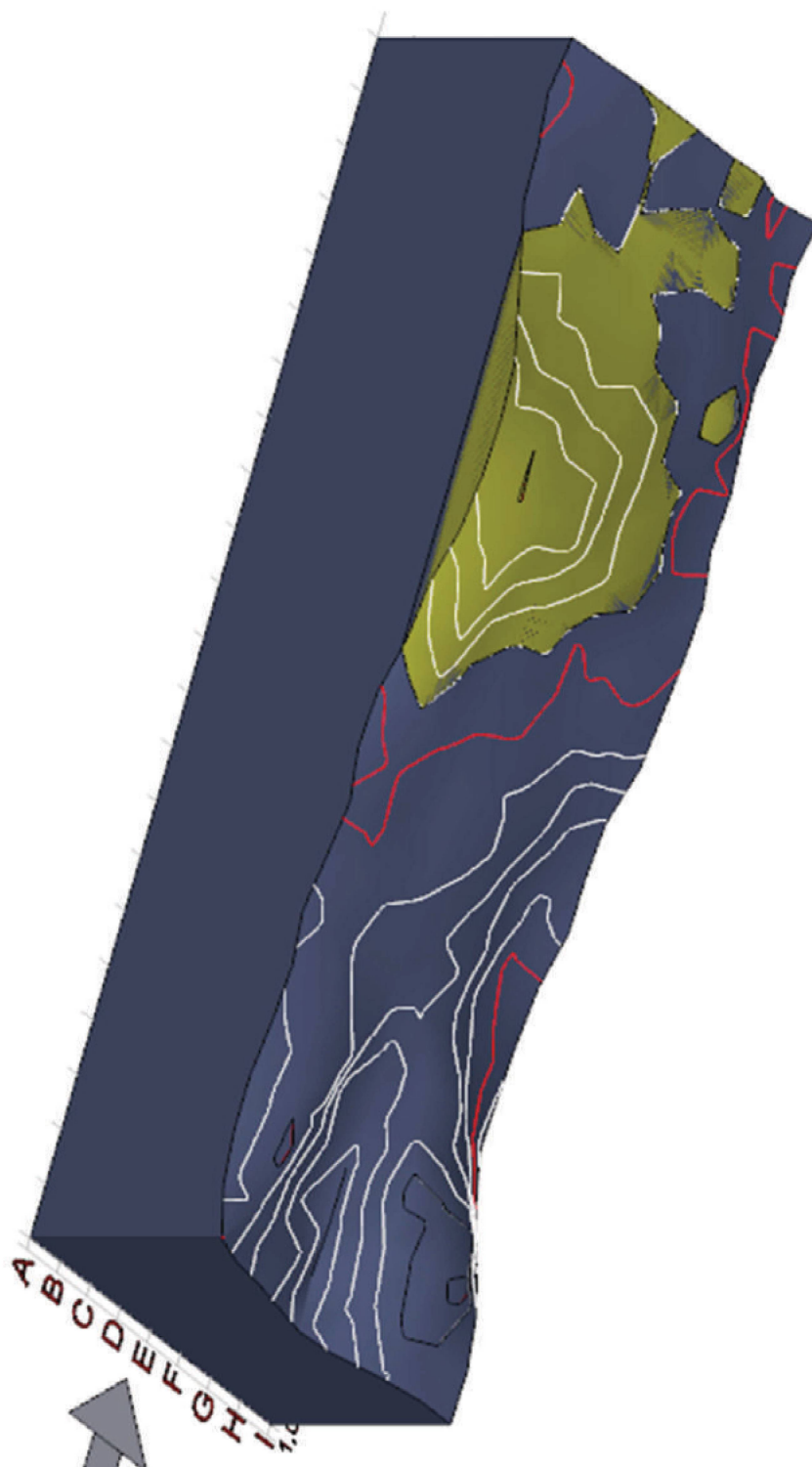
FIGURA 127 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. B – ETAPA 1





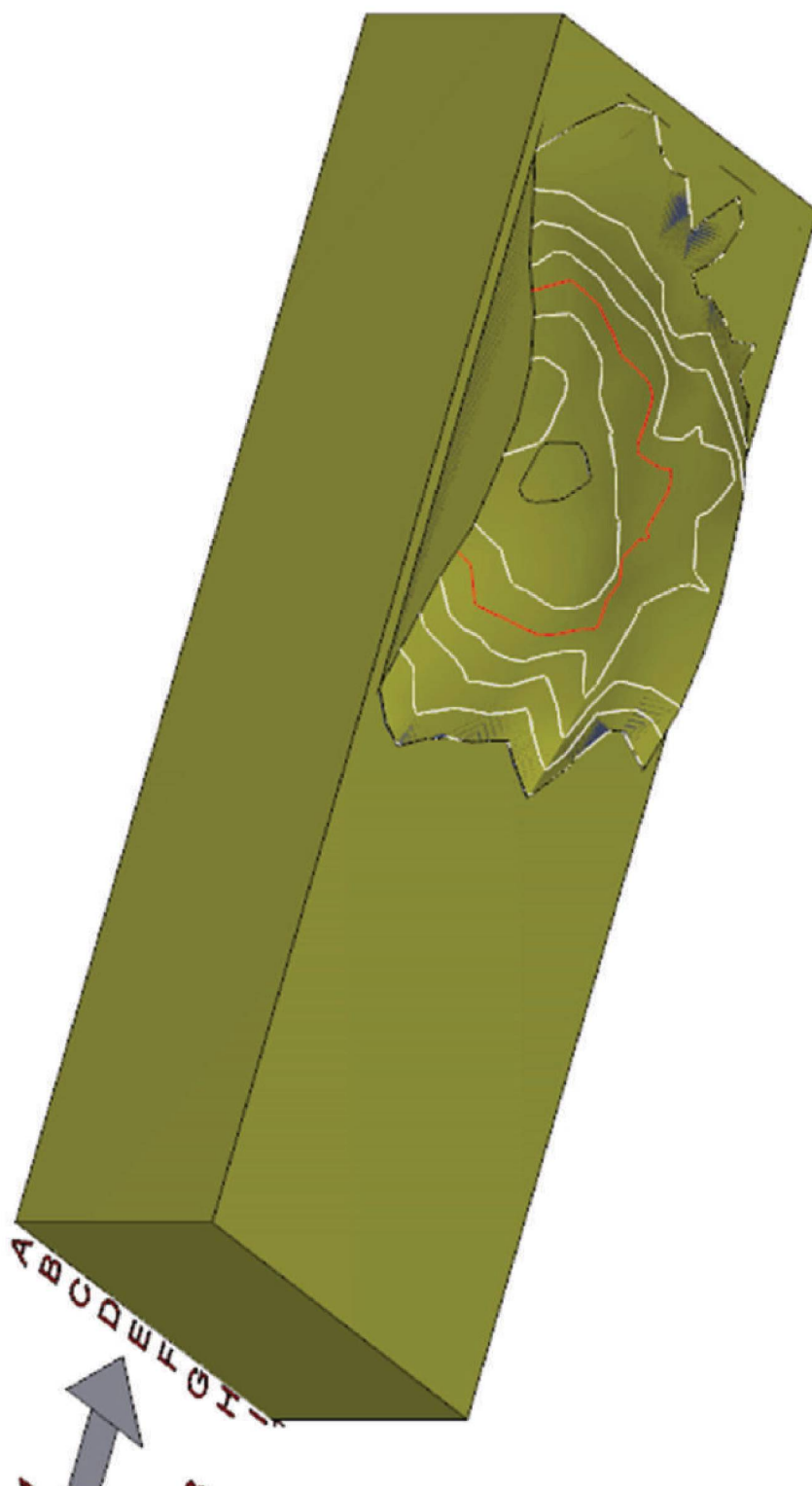
Alternativa B – Etapa 2

FIGURA 128 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. B – ETAPA 2



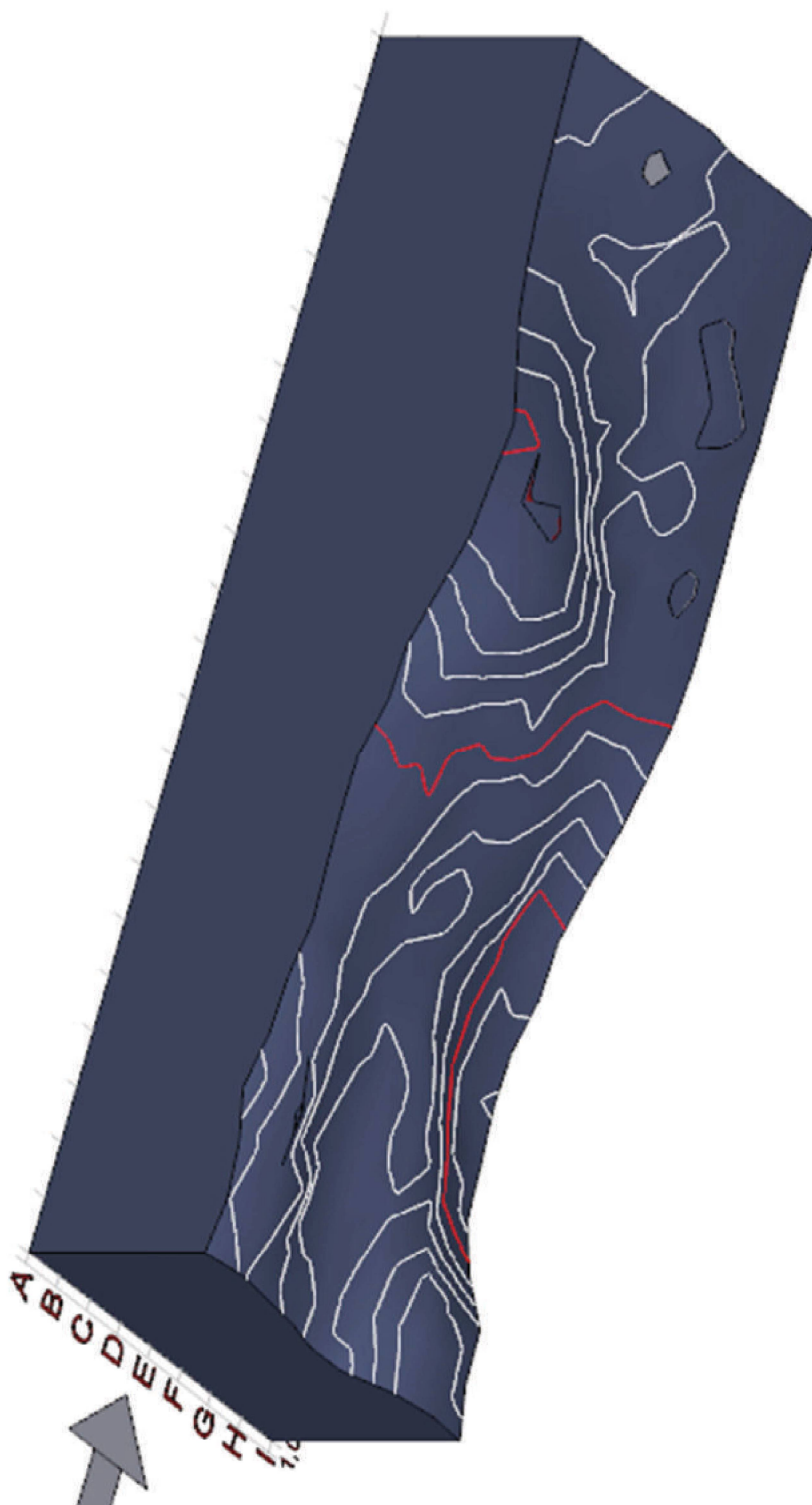
Alternativa C – Etapa 1

FIGURA 129 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. C – ETAPA 1



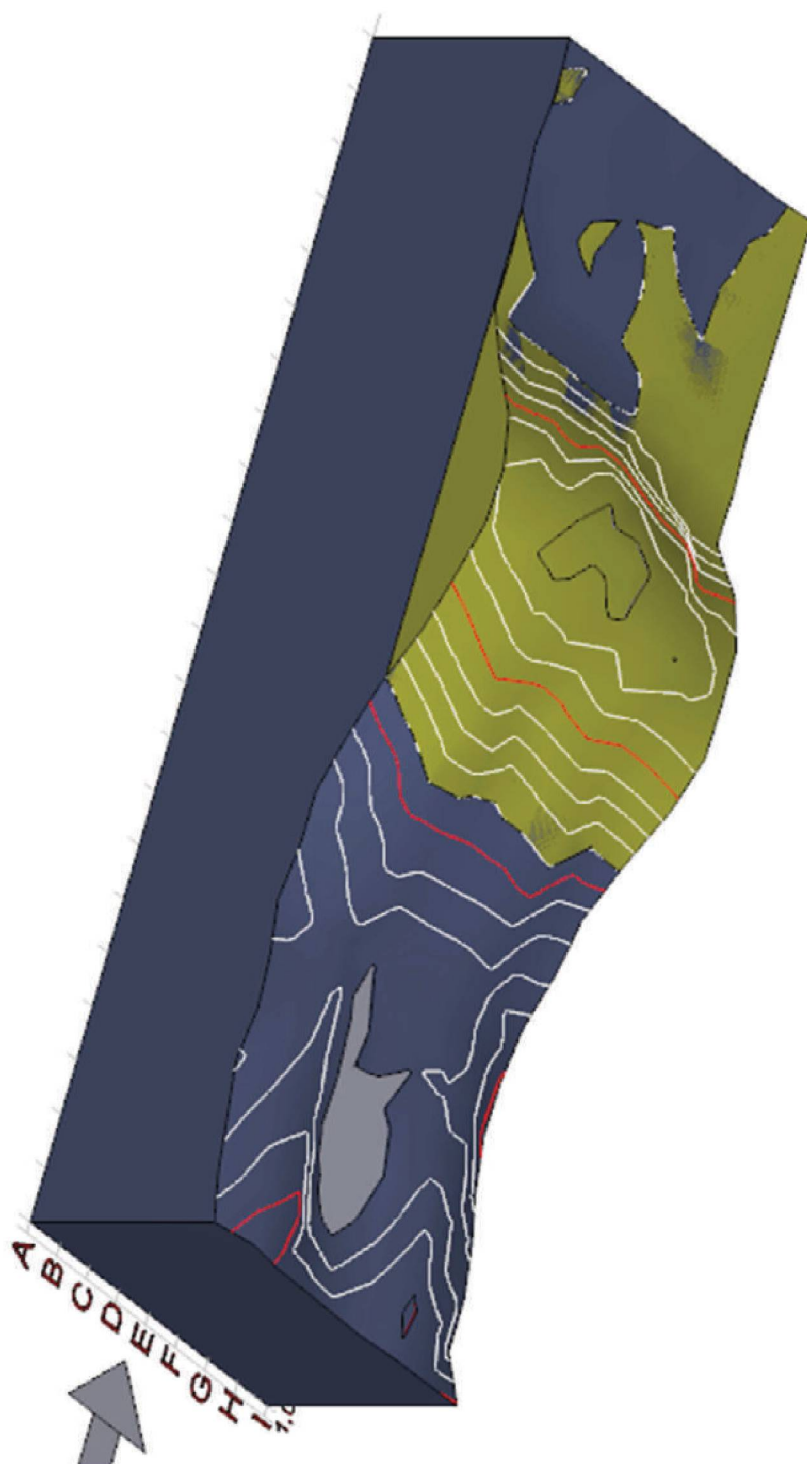
Alternativa C – Etapa 2

FIGURA 130 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. C – ETAPA 2



Alternativa D – Etapa 1

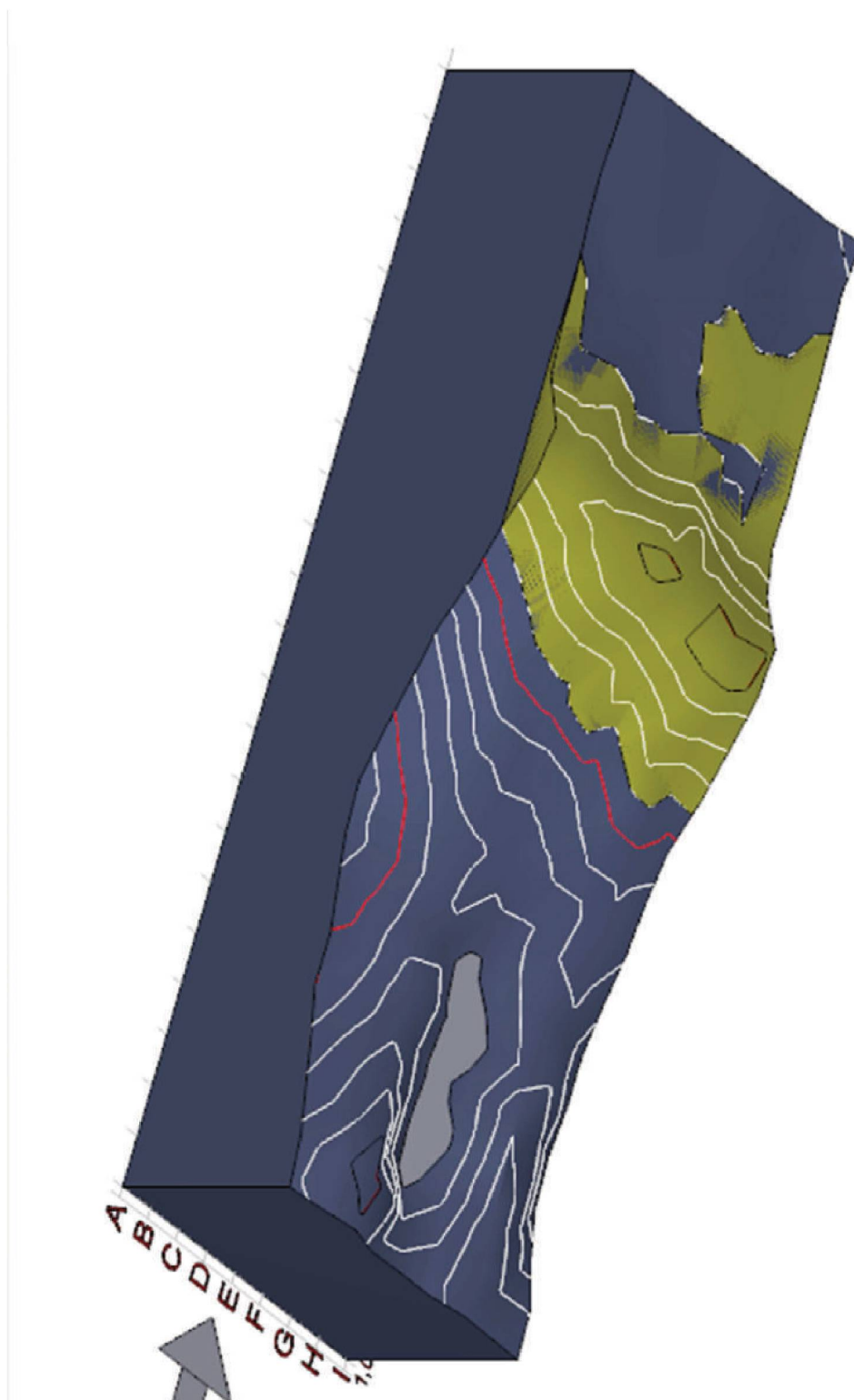
FIGURA 131 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. D – ETAPA 1





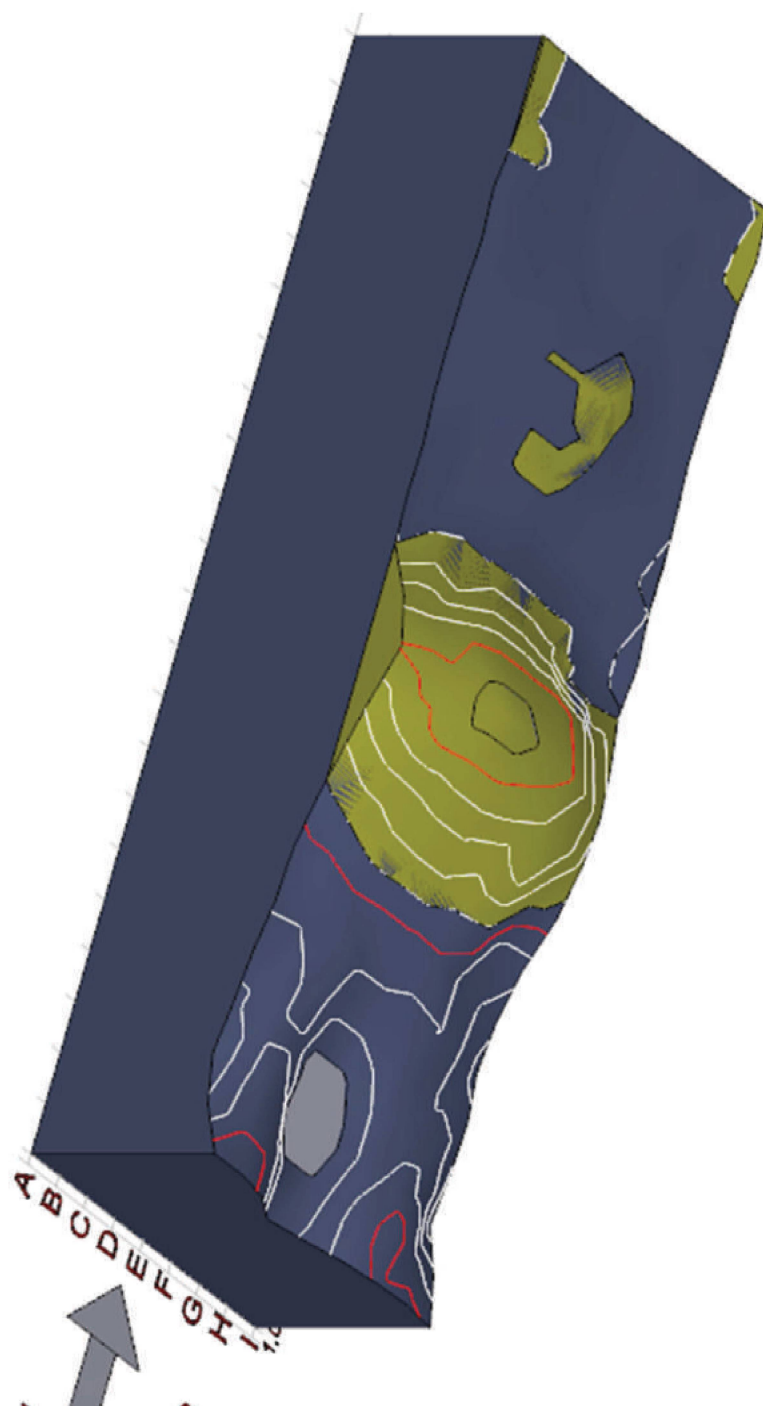
Alternativa D – Etapa 2

FIGURA 132 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. D – ETAPA 2



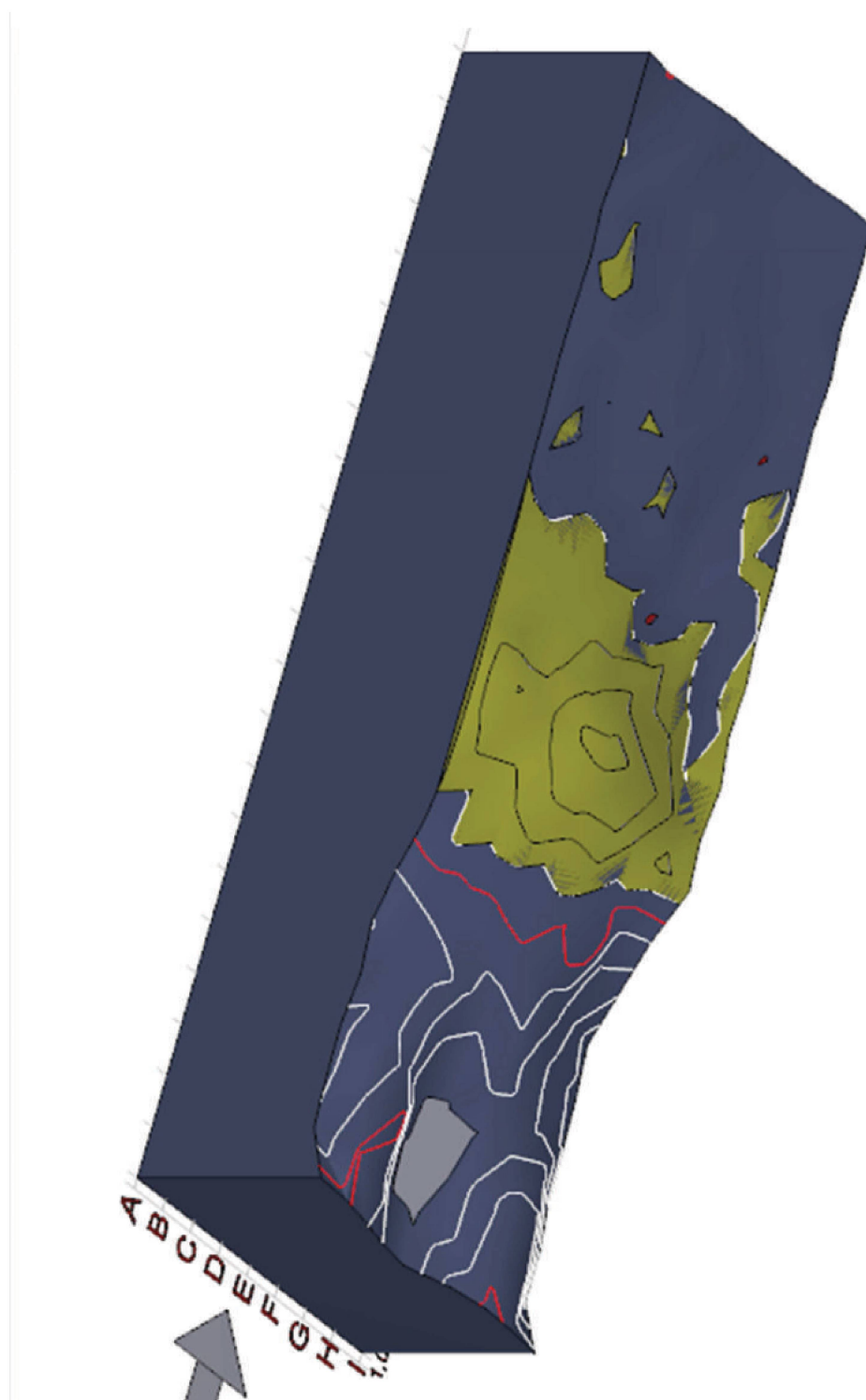
Alternativa E – Etapa 1

FIGURA 133 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. E – ETAPA 1



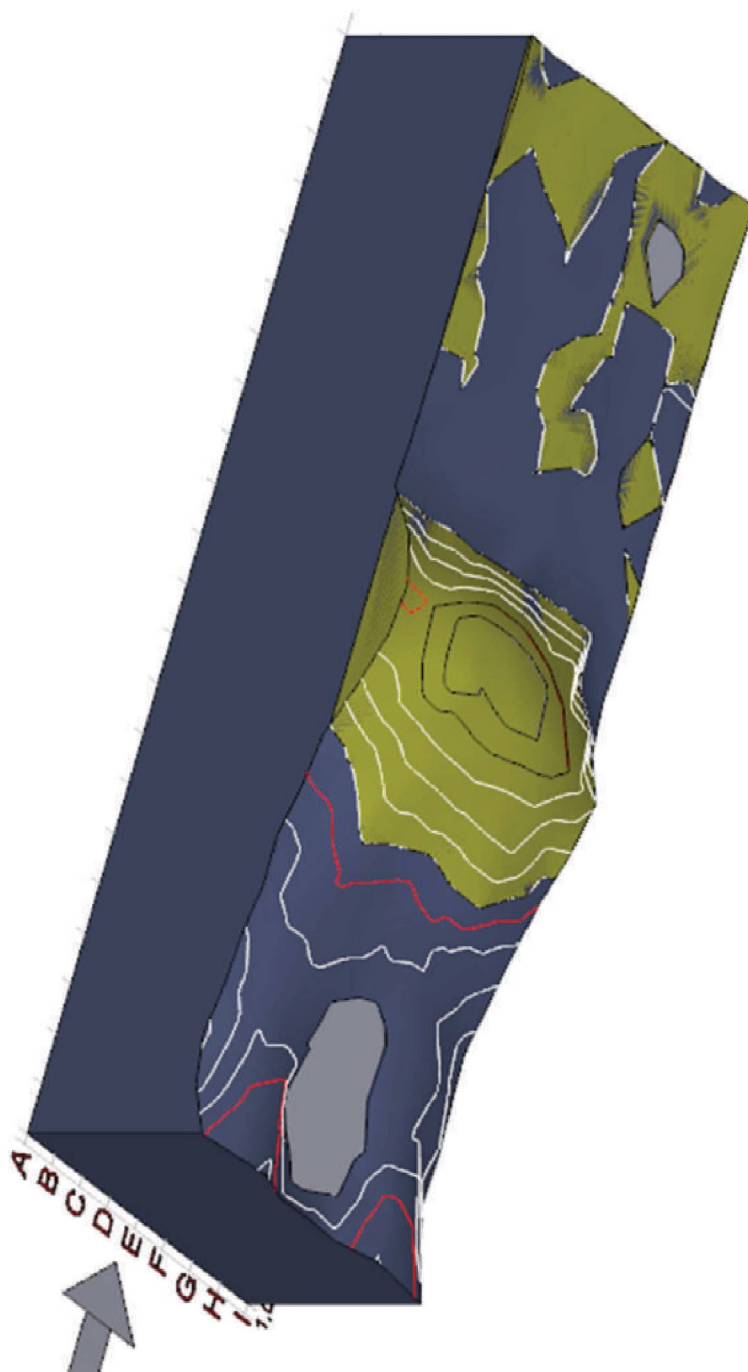
Alternativa E – Etapa 2

FIGURA 134 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. E – ETAPA 2



Alternativa F – Etapa 1

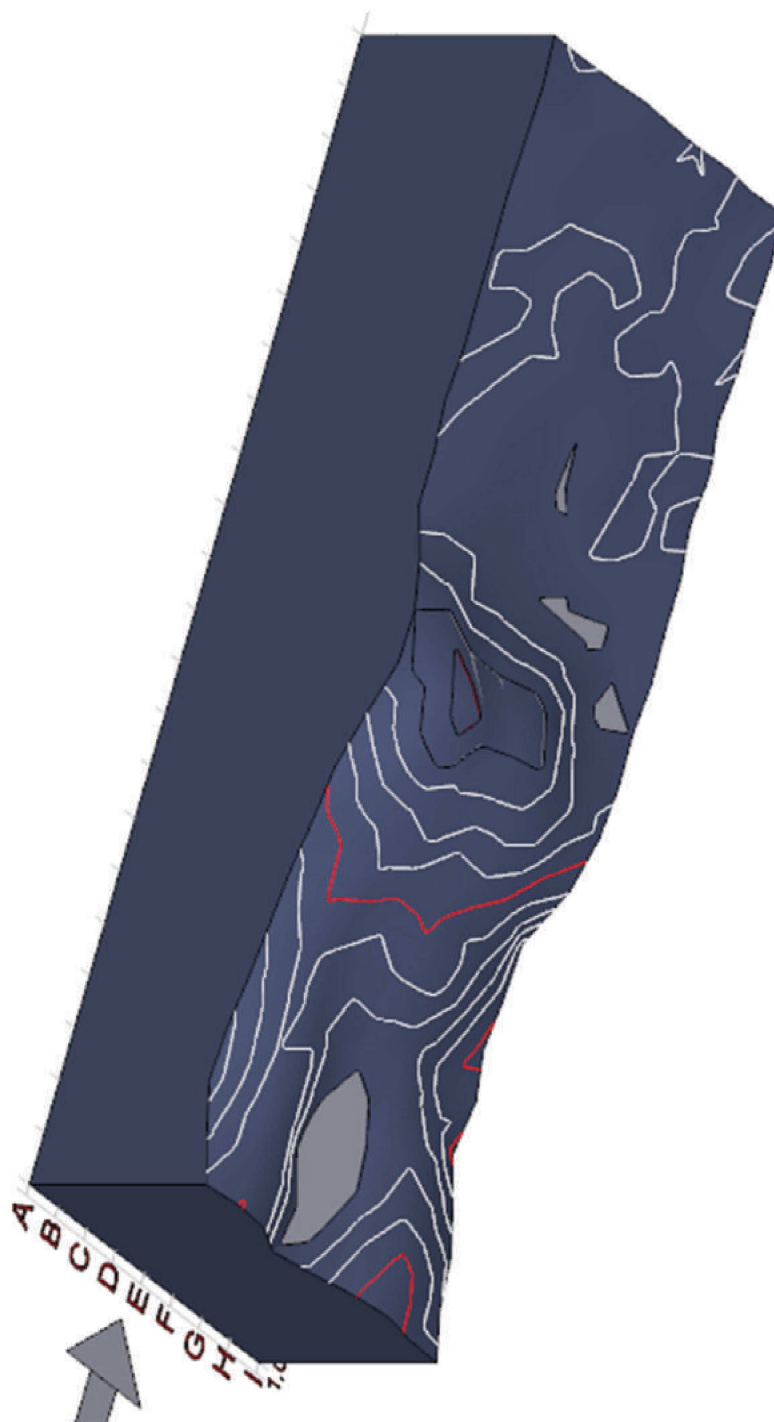
FIGURA 135 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. F – ETAPA 1





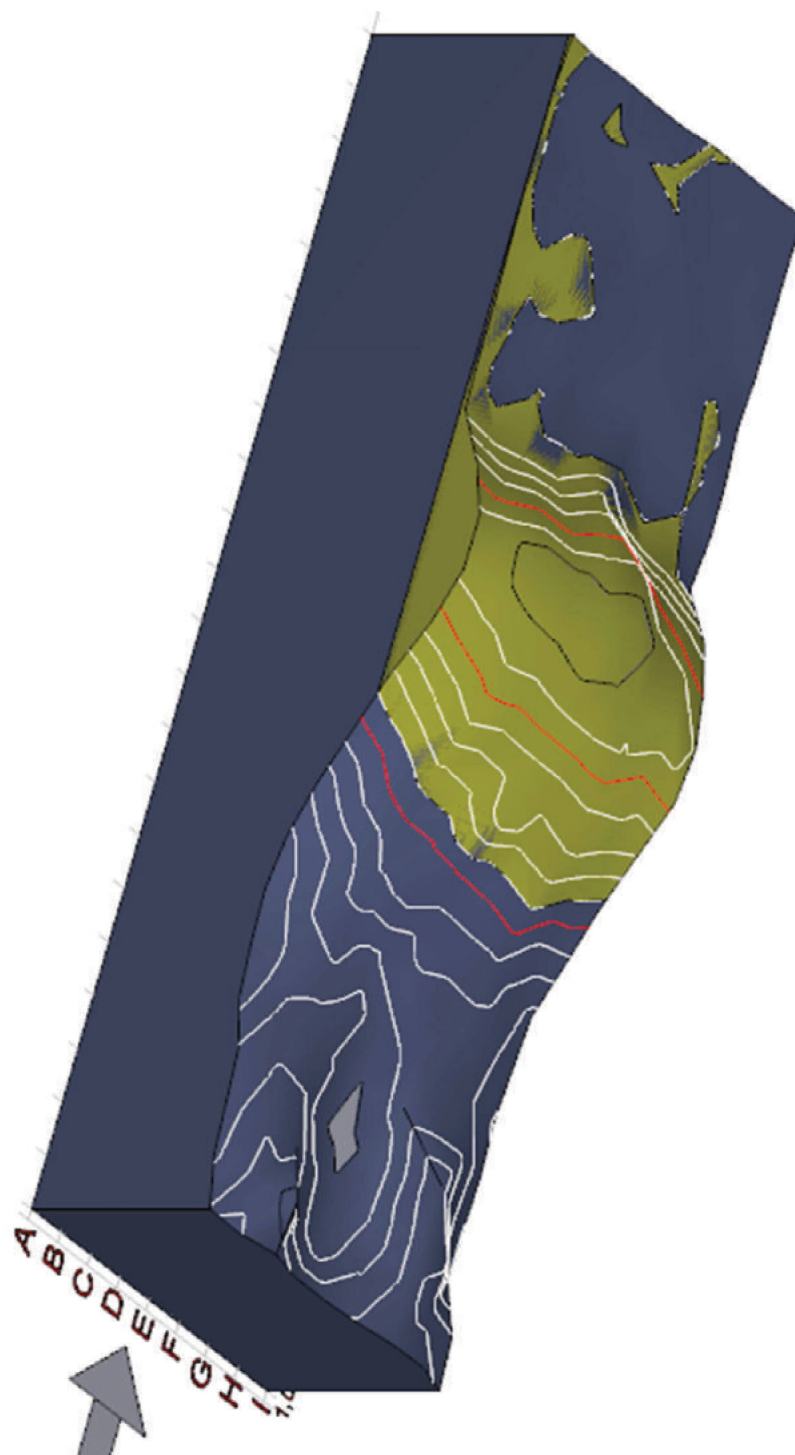
Alternativa F – Etapa 2

FIGURA 136 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. F – ETAPA 2



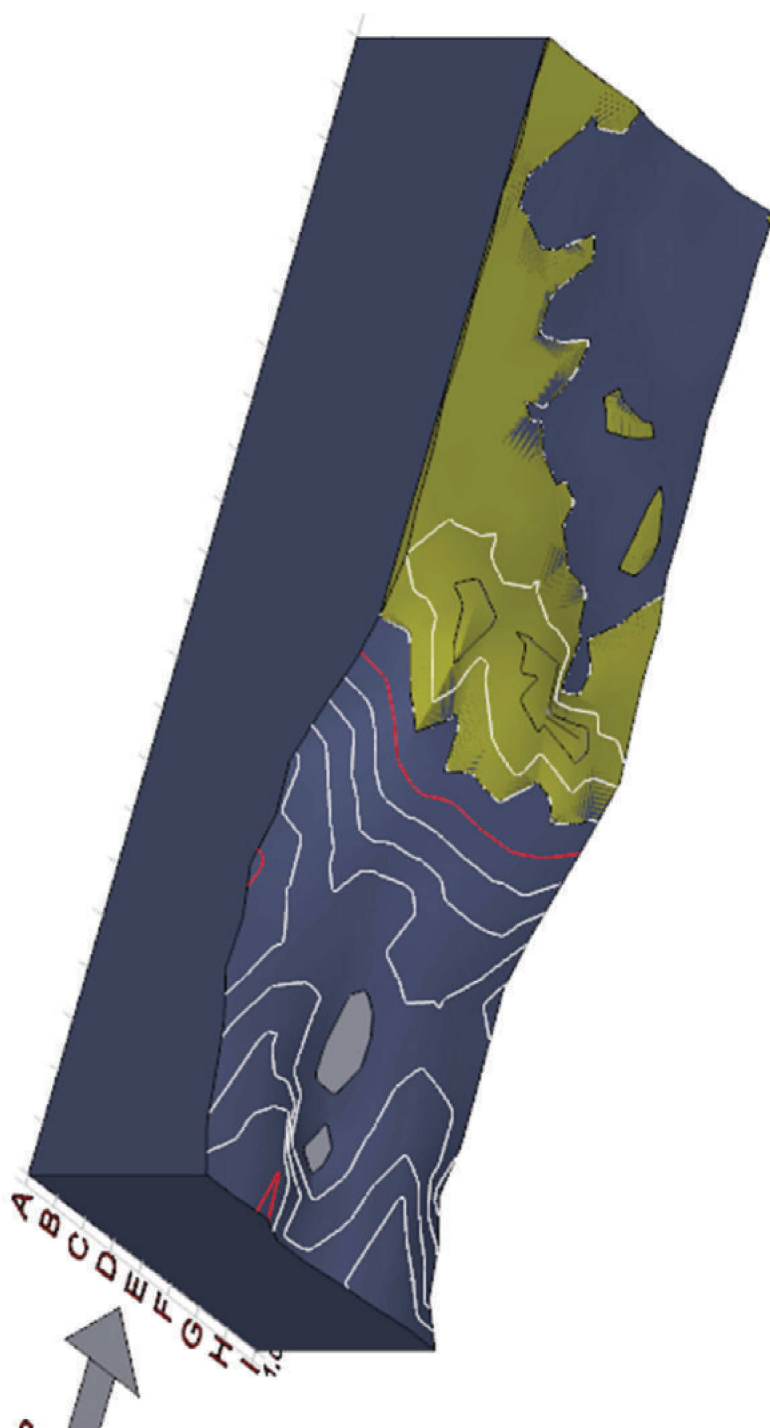
Alternativa G – Etapa 1

FIGURA 137 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. G – ETAPA 1



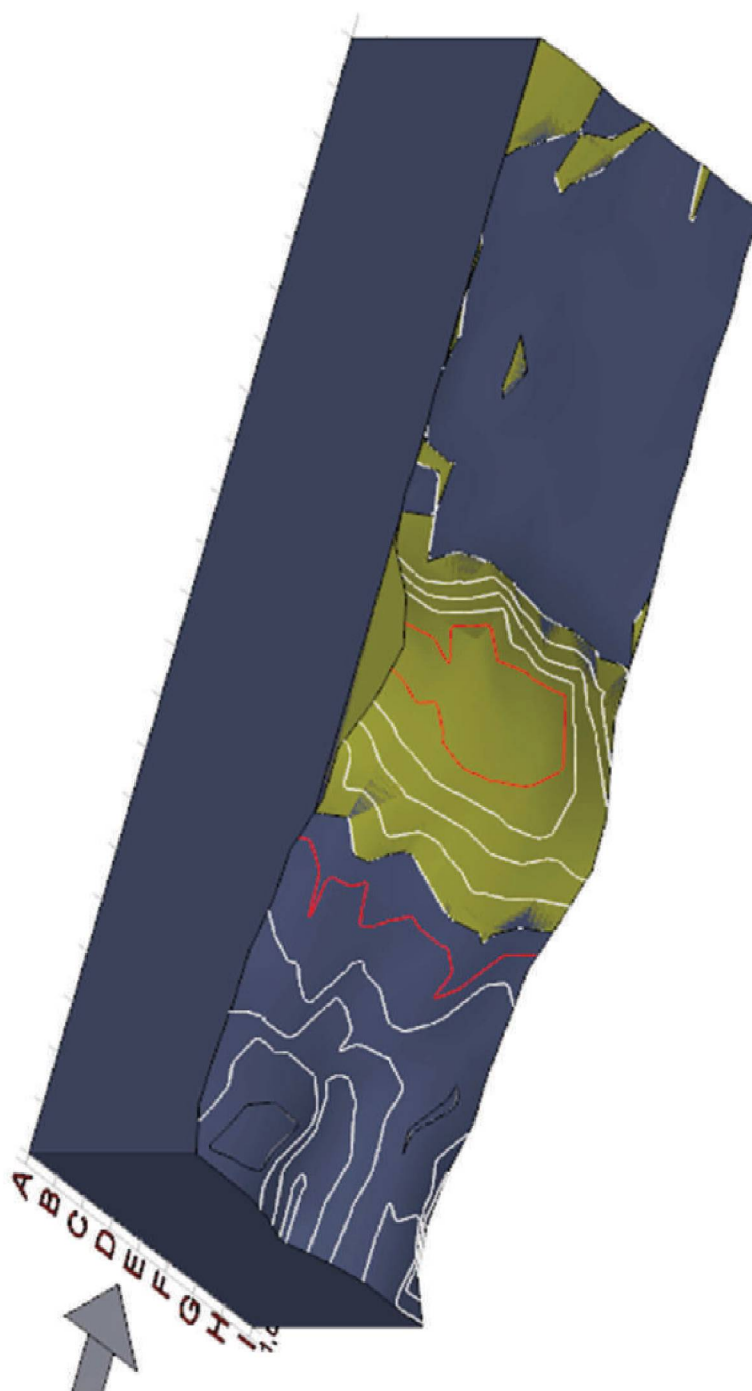
Alternativa G – Etapa 2

FIGURA 138 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. G – ETAPA 2



Alternativa H – Etapa 1

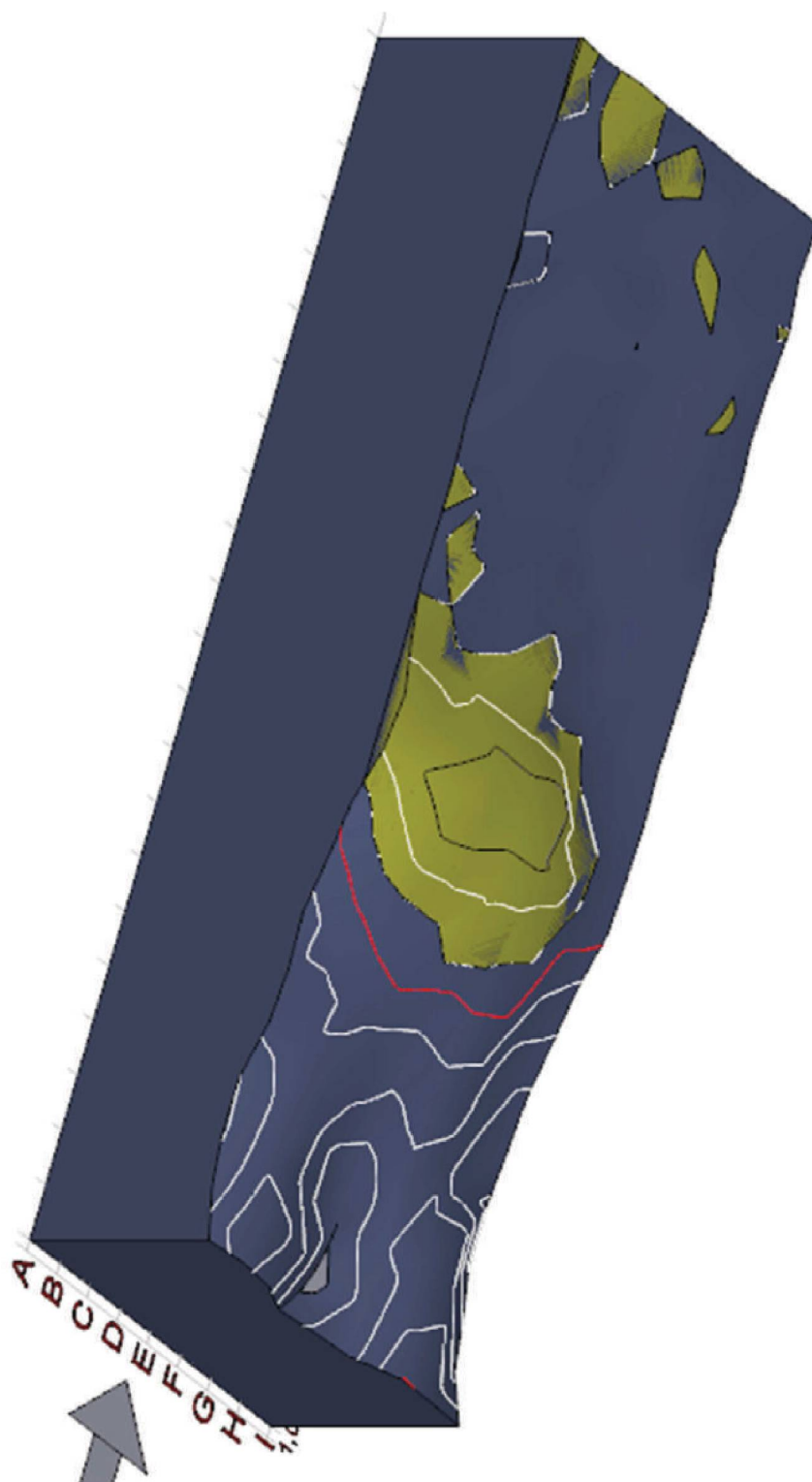
FIGURA 139 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. H – ETAPA 1





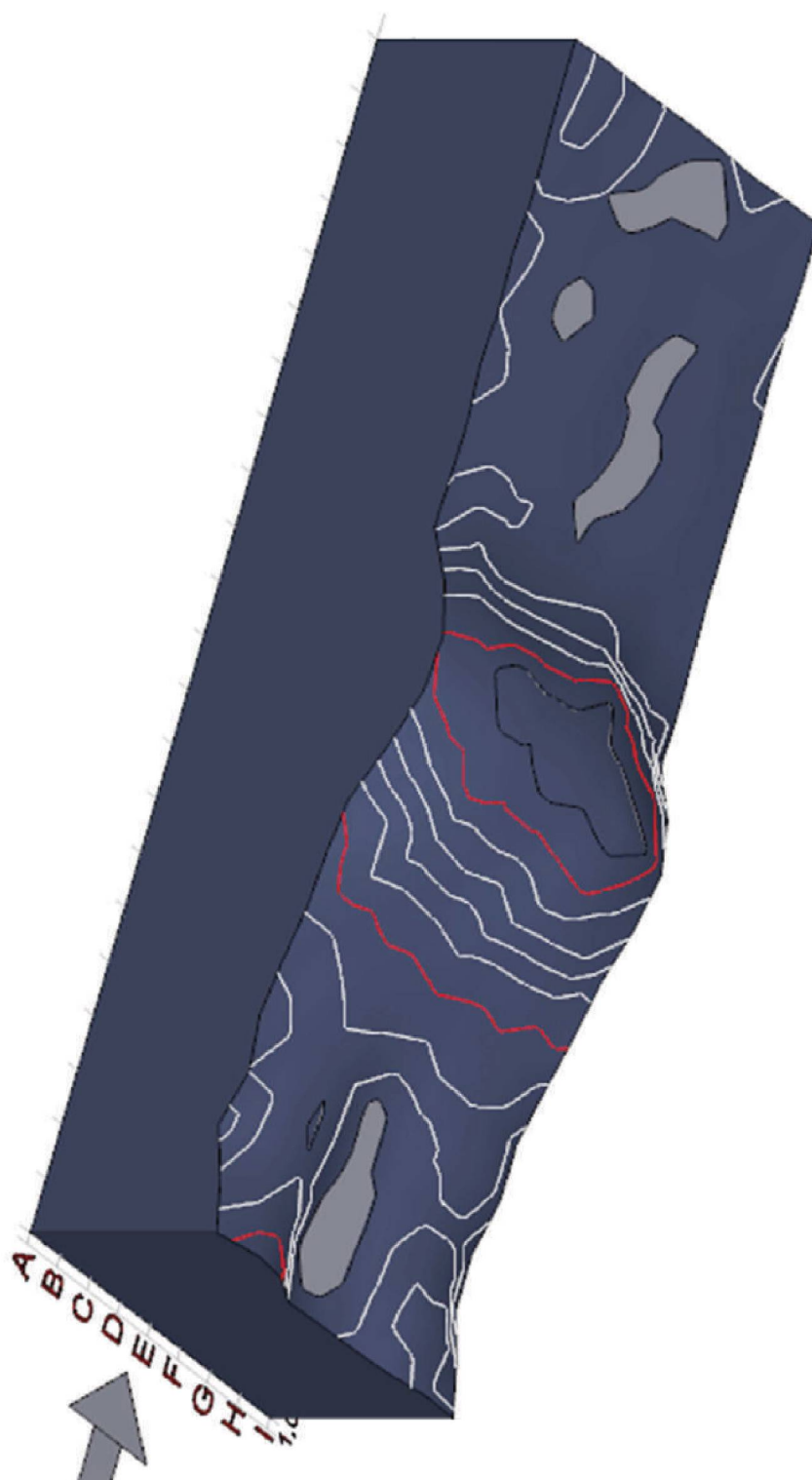
Alternativa H – Etapa 2

FIGURA 140 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. H – ETAPA 2



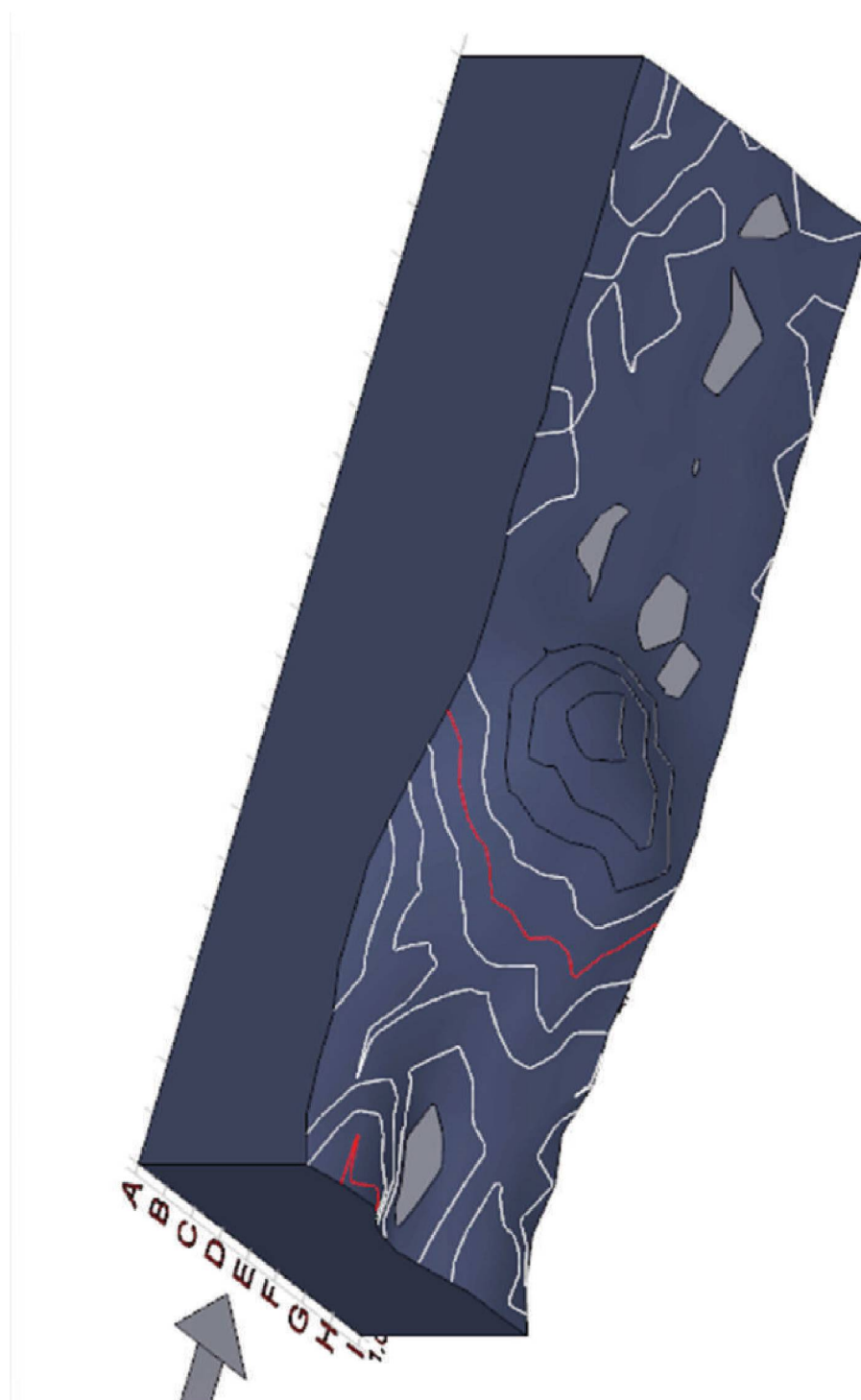
Alternativa I – Etapa 1

FIGURA 141 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. I – ETAPA 1



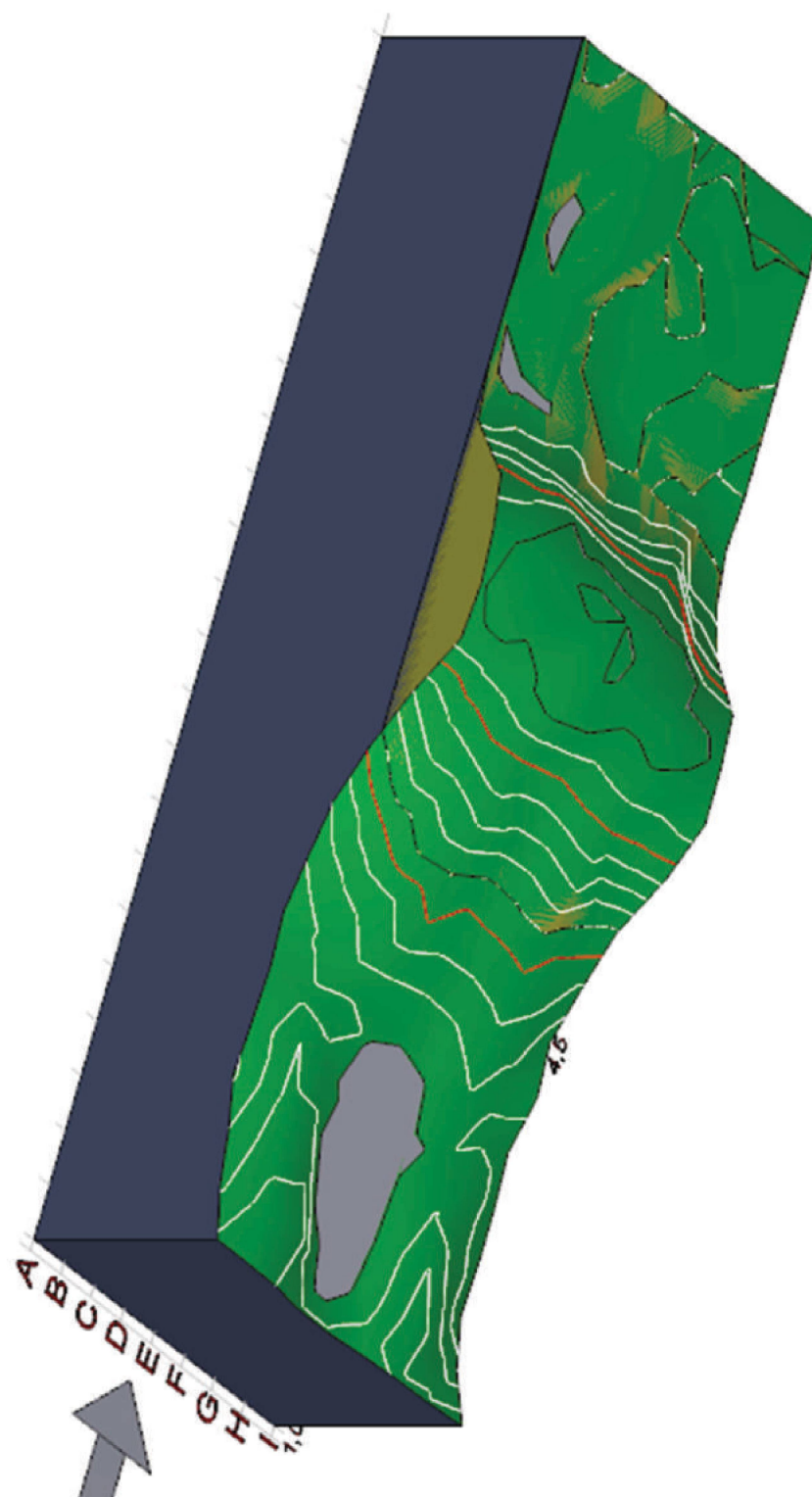
Alternativa I – Etapa 2

FIGURA 142 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. I – ETAPA 2



Alternativa J – Etapa 1

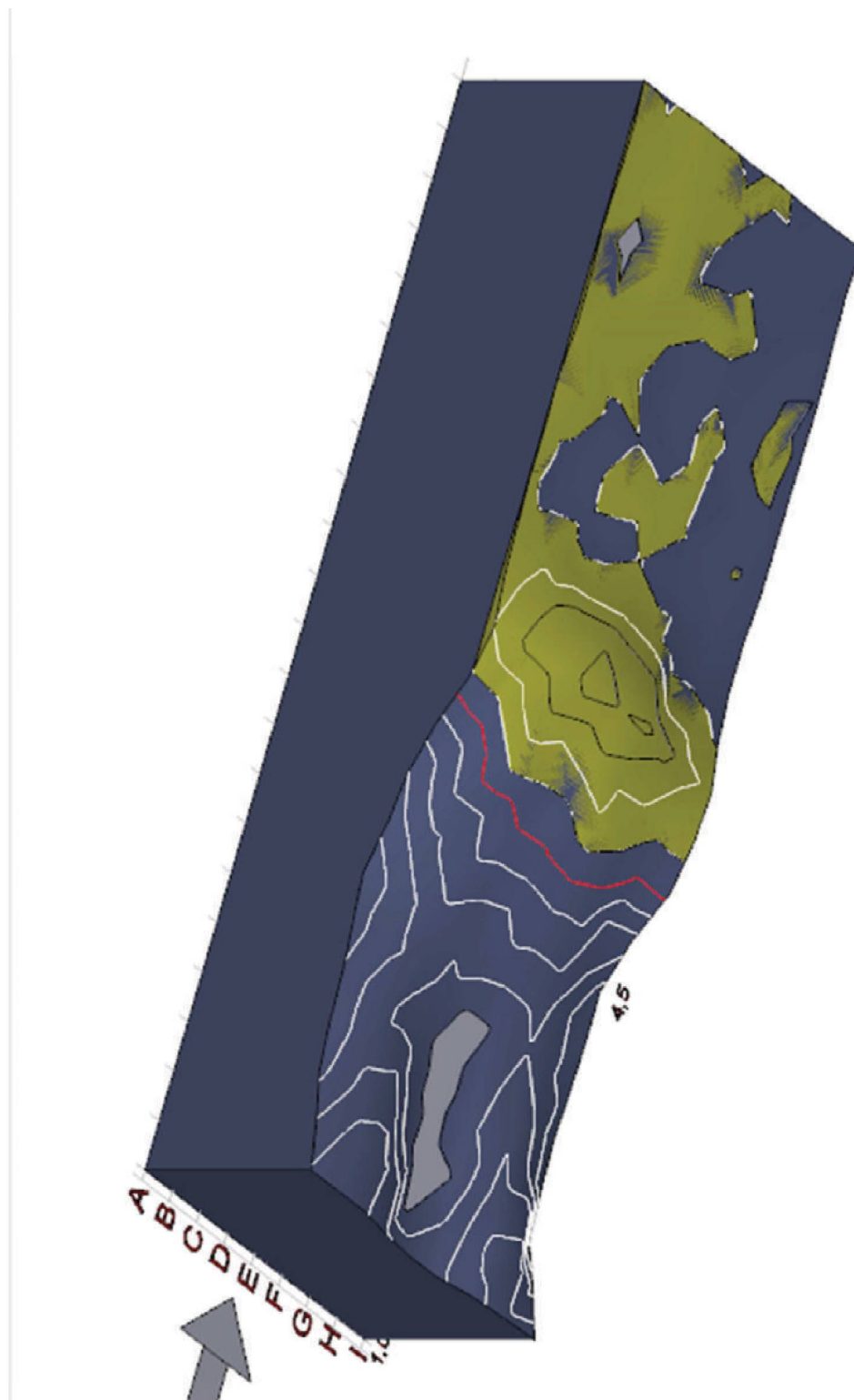
FIGURA 143 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. J – ETAPA 1





Alternativa J – Etapa 2

FIGURA 144 – SUPERFÍCIE DA FOSSA DE EROSÃO - ALT. J – ETAPA 2



## APÊNDICE H – COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO

Este apêndice apresenta os valores de comprimento do ressalto hidráulico convencional calculados conforme a bibliografia pesquisada e apresentada na Tabela 2 (Equações 03 a 23).

Autor	Data	Equação	Resultado no modelo (m)
Riegel e Beebe	1917	$L_j \cong 5(y_2 - y_1)$	0,81
Safranez	1927	$L_j \cong 5,2y_2$	1,10
Douma	1934	$L_j = 5,2y_2$	1,10
Ludin e Barnes	1934	$L_j = \left(4,5 - \frac{v_1}{v_c}\right)y_2$	0,44
Woycicki	1934	$L_j = (y_2 - y_1) \cdot \left(8 - \frac{0,05y_2}{y_1}\right)$	1,25
Smetana	1934	$L_j \cong 6(y_2 - y_1)$	0,97
Chertoussouv	1935	$L_j = 10,3y_1(Fr_1 - 1)^{0,81}$	1,18
Aravin	1935	$L_j = 5,4(y_2 - y_1)$	0,87
Page	1935	$L_j = 5,6y_2$	1,18
Bakhmeteff-Matzke	1936	$L_j = 5(y_2 - y_1)$	0,81
Ivanchenko	1936	$L_j = 10,6(y_2 - y_1)(Fr_1^2)^{-0,185}$	1,04
Ludin	1936	$L_j = \frac{y_2}{\left[0,22 - 0,17\left(\frac{v_c}{v_1}\right)\right]}$	1,41
Kinney	1941	$L_j = 6,02(y_2 - y_1)$	0,97
Posey	1941	$L_j = 4,5 - 7(y_2 - y_1)$	3,37
Wu	1949	$L_j = 10(y_2 - y_1)Fr_1^{-0,16}$	0,81
Peterka	1957	$L_j = 6,1y_2$	1,29
Elevatorski	1959	$L_j = 6,9(y_2 - y_1)$	1,11
Silvester	1964	$L_j = 9,75y_1(Fr_1 - 1)^{1,01}$	1,37
Hager et al.	1992	$L_j/y_1 = 220tgh[(Fr_1 - 1)]$	10,92
Marques et al	1997	$L_j = 8,5(y_2 - y_1)$	1,37
Teixeira	2003	$L_j = 8(y_2 - y_1)$	1,29